

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

KAMILLA SIQUEIRA AQUINO
LAURA KORMANN

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXAUSTÃO DE UMA PLANTA
INDUSTRIAL

DIADEMA - SP
2021

KAMILLA SIQUEIRA AQUINO
LAURA KORMANN

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXAUSTÃO DE UMA PLANTA
INDUSTRIAL

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química, ao Instituto de
Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas
da Universidade Federal de São Paulo – Campus
Diadema.**

**Orientador:
Prof^ª Dr^a Gisele Atsuko Medeiros Hirata**

**Coorientador:
Prof^º Dr^º Rafael Maurício Matricarde Falleiro**

DIADEMA - SP

2021

Dados Internacionais da Catalogação na Publicação (CIP)

Aquino, Kamilla Siqueira

Estudo da eficiência do sistema de exaustão de uma planta industrial / Kamilla Siqueira Aquino, Laura Kormann. – – Diadema, 2021.

67 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema, 2021.

Orientadora: Profª Drª Gisele Atsuko Medeiros Hirata

Coorientador: Profº Drº Rafael Maurício Matricarde Falleiro

1. Sistema de exaustão. 2. Transporte pneumático. 3. Material particulado. 4. Eficiência. 5. Melhoria de processo. I. Kormann, Laura.
II. Título.

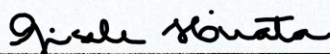
KAMILLA AQUINO SIQUEIRA
LAURA KORMANN

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXAUSTÃO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

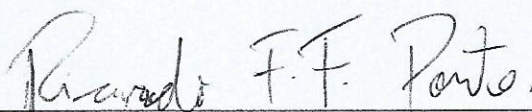
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, ao Instituto de
Ciências Ambientais, Químicas e
Farmacêuticas da Universidade Federal
de São Paulo – Campus Diadema.

Aprovado em: 22/02/2021

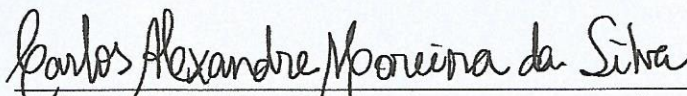
BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Dr^a. Gisele Atsuko Medeiros Hirata
Orientador



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Fernandes Pontes



Prof. Dr. Carlos Alexandre Moreira da Silva

Diadema (SP)
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre abrir os meus caminhos, colocar pessoas boas na minha vida e a ter me dado a sabedoria de que cada coisa acontece no seu momento certo. Aos meus pais, Maurício e Chaena, que nunca mediram esforços para investir na minha educação e cursos de desenvolvimento pessoal, além de sempre se esforçarem a me ajudar em todos os assuntos referentes à vida acadêmica que fossem de seus alcances. Ao meu namorado, Juan, que além de companheiro e amigo, compartilhou e cresceu comigo diferentes ciclos da vida: colégio, cursinho e por fim (finalmente!) a graduação. Aos meus avós, Marilena, Wilson, Neide e Luiz que sempre torceram por mim e vibraram a cada minha pequena conquista.

Agradeço às minhas melhores amigas: Laura, Thaise, Folashade e Francini que foram minhas principais companheiras ao longo destes seis anos de graduação e que eu tive o privilégio de poder compartilhar, não só as vivências universitárias, como também a vida pessoal. Com a presença delas todas as dificuldades foram encaradas com mais leveza.

Agradeço também aos meus líderes educadores de estágio, Mathews e Julia, profissionais excelentes os quais tive a oportunidade de conhecer, ser orientada, incentivada e desafiada a desenvolver este tema de Trabalho de Conclusão de Curso.

Kamilla Siqueira Aquino

Agradeço primeiramente aos meus pais, Gilberto e Rosana, pela dedicação em minha criação e por todo apoio, incentivo e amor. Aos meus irmãos, Letícia, Livia e Lucas, por estarem sempre comigo, me proporcionando momentos de descontração e alegria. Ao meu sobrinho, João Lucas, por transbordar meu coração de amor e carinho, enchendo-me de vida.

Agradeço às minhas amigas de infância, Natielle e Stephanie, que estiveram sempre dispostas a me ajudar, confortar e alegrar. Aos meus amigos Kamilla, Mohamad e Thaise que estiveram ao meu lado, socorrendo-me em situações de desespero, dividindo as angústias e multiplicando os bons momentos. Às minhas amigas e colegas de república Danielly e Thayna, por ouvirem meus anseios e oferecerem sempre parceria.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, Alves, Andressa, Camila, Daniela, Marina, Matheus e Willian por todo apoio, confiança e motivação em minha vida profissional.

Laura Kormann

Somos imensamente gratas aos nossos queridos professores e orientadores Dr^a Gisele Atsuko Medeiros Hirata e Dr^o Rafael Maurício Matricarde Falleiro, por todo apoio, paciência e dedicação desde o início de nossas jornadas, como orientadores de Iniciação Científica e, agora, com a orientação desta monografia, nos inspirando a sermos profissionais melhores.

Agradecemos à empresa, pela autorização do uso dos dados, e a todos os engenheiros e operadores pela disponibilidade em ajudar na obtenção dos mesmos.

RESUMO

O transporte pneumático é um dos métodos de deslocamento de sólidos muito utilizado atualmente e os sistemas de exaustão local empregam esta operação unitária para transportar os particulados capturados nos diversos pontos de emissão até um equipamento coletor, onde são retidos, prevenindo assim, riscos ao processo, à saúde e ao meio ambiente, uma vez que em altas concentrações os materiais particulados podem ser considerados poluentes. O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a eficiência de um sistema de exaustão local que possui problemas de obstrução, super exaustões e perdas de material para o ambiente, instalado em uma planta industrial, de acordo com as recomendações físicas de instalação e de parâmetros de escoamento. Para isto, dados do projeto e reais foram coletados, o que, considerando o ar como fluido incompressível e que o transporte pneumático ocorra em fase diluída, permitiu a efetuação de diversos cálculos, utilizando o software EXCEL, para determinação das velocidades, perda de carga e potência exigida dos exaustores. Após analisar os dados obtidos e avaliar os parâmetros envolvidos no processo (propriedades das partículas, velocidade de escoamento, diâmetro dos dutos, tipos de captosres, perda de carga devido ao escoamento e eficiência dos exaustores) constatou-se que as características das partículas facilitam a ocorrência de obstruções, as velocidades possuem desvios em relação às recomendações de literatura, o que em alguns trechos propicia as super exaustões e em outros dificulta o arraste das partículas, além disso, os captosres instalados não são projetados de forma a maximizar a captura das partículas, o que propicia as perdas para o ambiente, e os exaustores atuam de forma sobrecarregada. A fim de reduzir esses problemas e aumentar a eficiência do sistema foram propostas duas diferentes melhorias, sendo uma delas a alteração apenas dos diâmetros dos trechos com super exaustões, uma vez que constatou-se que as altas velocidades possuem alto impacto na perda de carga e a outra o redimensionamento do sistema como um todo, o que inclui a troca do tipo dos captosres, para que as velocidades de todos os trechos correspondam às faixas recomendadas para boa operabilidade do sistema. Em ambas as propostas os exaustores instalados são capazes de atender à nova perda de carga.

Palavras chave: sistema de exaustão, transporte pneumático, material particulado, perda de carga, eficiência, indústria petroquímica-termoplástica, melhoria de processo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificações dos diferentes tipos de aerossóis/contaminantes do ar e suas características.....	14
Tabela 2. Velocidade do ar em canalizações segundo a ASHRAE.....	27
Tabela 3. Equipamentos de coleta (Perdas em mmca)	32
Tabela 4. Características físicas dos materiais particulados do processo (aditivos)	37
Tabela 5. Vazões e diâmetros de processo (projeto e real)	39
Tabela 6. Acessórios e comprimento das tubulações	40
Tabela 7. Velocidades dos trechos do sistema	46
Tabela 8. Quantidade de acessórios e comprimentos equivalentes	42
Tabela 9. Valores para perda de carga.....	49
Tabela 10. Perda de carga, vazão e potência para as diversas condições de operação do sistema	50
Tabela 11. Valores para perda de carga (melhoria).....	51
Tabela 12. Percentuais para redução de perda de carga	51
Tabela 13. Novos diâmetros e perdas de carga do sistema de exaustão.....	53
Tabela 14. Perda de carga, vazão e potência estimadas para o novo projeto	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparação entre o arranjo e utilização dos transportes pneumáticos de pressão positiva e negativa	17
Figura 2. Diagrama de Geldart	18
Figura 3. Diagrama de Geldart adaptado.....	18
Figura 4. Regime de transporte Moving Bed Flow das partículas	18
Figura 5. Regime de transporte “Slug Flow”.....	19
Figura 6. Regime de transporte “Plug Flow”	19
Figura 7. Classificação dos diferentes tipos de Ventilação Industrial.....	22
Figura 8. Componentes de um sistema de exaustão local	25
Figura 9. Ramo secundário (derivação).....	33
Figura 10. Valores para K tabelados	34
Figura 11. Fluxograma geral do processo	35
Figura 12. Fluxograma específico do sistema de Exaustão local.....	35
Figura 13. Propriedades dos aditivos (antigos, novos e de projeto) do sistema de exaustão local	44
Figura 14. Exemplo de instalação do captor nos pontos de exaustão da esteira e balanças de aditivos	48
Figura 15. Novos diâmetros para o sistema de exaustão.....	54

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	<i>Objetivos</i>	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	<i>Material Particulado</i>	13
2.1.1	Riscos industriais causados pelo material particulado.....	15
2.2	<i>Transporte Pneumático</i>	16
2.2.1	Classificação e Diagrama de Geldart.....	17
2.2.2	Variáveis de processo que influenciam na eficiência do transporte	20
2.2.2.1	Velocidade real do sistema.....	20
2.2.2.2	Velocidade de saltitação e velocidade mínima teórica.....	21
2.2.2.3	Velocidade da partícula	21
2.3	<i>Ventilação Industrial</i>	22
2.4	<i>Sistema de Exaustão</i>	24
2.4.1	Captores	25
2.4.2	Rede de dutos.....	26
2.4.3	Máquinas de fluxo.....	27
2.4.4	Filtro manga	29
2.5	<i>Perda de Carga</i>	31
3.	METODOLOGIA.....	34
3.1	<i>Descrição do processo estudado</i>	34
3.2	<i>Dados do Processo</i>	37
3.2.1	Material particulado	37
3.2.2	Vazões de escoamento e especificações das tubulações.....	37
3.2.3	Equipamentos do sistema de vácuo	38
3.2.4	Identificação dos problemas de processo.....	38
3.3	<i>Descritivo dos cálculos</i>	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43

4.1	<i>Propriedades das partículas e tipo de transporte</i>	43
4.2	<i>Velocidade de transporte e diâmetros das tubulações</i>	45
4.3	<i>Captores</i>	48
4.4	<i>Perda de carga e eficiência do sistema</i>	48
4.5	<i>Redimensionamento do sistema de exaustão</i>	52
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
6.	REFERÊNCIAS	58
7.	ANEXOS	60

1. INTRODUÇÃO

Indústrias químicas e petroquímicas realizam processos que têm como principal objetivo a transformação da matéria-prima em um produto comercializável e para isso, são necessárias diversas operações unitárias, incluindo o transporte do material particulado. Esses sólidos são considerados poluentes quando suspensos na atmosfera em quantidades acima dos limites permitidos e, conseqüentemente oferecem risco ao meio ambiente, sendo assim, diante à crescente preocupação com questões ambientais, as indústrias têm optado por um transporte limpo, visando a minimização da emissão dessas partículas na atmosfera.

Um dos métodos de deslocamento de sólidos muito empregado atualmente é o transporte pneumático, uma vez que apresenta diversas vantagens, como menor custo de obtenção, fácil mudança de direção do fluxo, requerimento de menor quantidade de manutenção, fácil controle, equipamento compacto e possibilidade de envio de materiais a longas distância, além de ser fechado, impedindo a contaminação devido ao contato com o meio externo. A movimentação é feita pela utilização de um fluido motriz, que escoar, devido à ação de um compressor ou ventilador, por uma rede de dutos posicionados estrategicamente. O fluido empregado é geralmente o ar atmosférico, em consequência do baixo custo, facilidade de manipulação e não toxicidade, mas em condições específicas outros fluidos podem ser empregados, como o nitrogênio. O transporte pneumático pode operar em fase diluída, com pressões de no máximo 15 psig (1 barg) ou a vácuo e baixa concentração de sólidos (abaixo de 15 kg sólido/kg ar), ou em fase densa, cujas pressões de operação estão no intervalo de 15 a 70 psig (1 a 4 barg) e as concentrações de sólidos variam entre 15 e 50 kg sólido/kg ar (TEIXEIRA, 2019).

Sistemas de exaustão local utilizam essa operação unitária para efetuar o transporte das partículas capturadas, no ponto em que são produzidas ou liberadas, até um equipamento de retenção, como por exemplo o filtro manga. Esse processo permite a retenção dos sólidos e evita a dispersão dos mesmos no ar, que pode vir a prejudicar a visibilidade do local e a saúde dos profissionais que atuam na indústria, além de contribuir para o agravamento de problemas ambientais.

Ao escoar pelo sistema, o gás contaminado sofre queda de pressão, não somente em consequência da energia gasta para completar o percurso, mas também devido aos choques das partículas com as paredes da tubulação, equipamentos e acessórios. Essa queda

caracteriza a perda de carga do sistema, que deve ser mínima, uma vez que quanto maior seu valor, maior a potência exigida da máquina motriz.

Além da perda de carga que influencia no gasto energético do processo, os diâmetros dos dutos e as velocidades de escoamento também são parâmetros importantes a serem analisados, pois influenciam na vazão do fluido motriz. O ideal é que as velocidades mantenham-se baixas, em um valor ótimo, pois isso garante uma menor perda de carga distribuída, menores problemas de erosão das partículas, evita perdas de pressão as quais favorecem eventuais depósitos dos sólidos na tubulação e economiza energia do trabalho requerido pela máquina motriz do transporte. Para diminuir a velocidade, pode-se aumentar o diâmetro das tubulações e garantir o menor número possível de acessórios instalados (TEIXEIRA, 2019).

Neste trabalho serão estudados os parâmetros acima citados de um sistema de exaustão local de uma planta industrial que utiliza o transporte pneumático em fase diluída com ar atmosférico para deslocamento dos sólidos até um filtro manga, onde os mesmos são retidos, a fim de verificar se as velocidades empregadas atualmente são adequadas, se há modificações a serem feitas que melhorem o funcionamento do sistema e definir a perda de carga total para constatar se a potência do compressor empregado é suficiente para o sistema de exaustão.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a avaliação da eficiência do sistema de exaustão de uma planta industrial a partir da análise dos seguintes parâmetros de processo: propriedades das partículas, velocidade de escoamento, diâmetro das tubulações, tipos de captadores, perda de carga e capacidade energética dos exaustores. Após as análises, mapear quais destes parâmetros são potenciais causadores dos problemas frequentes deste sistema (obstruções, super exaustões e perda de partículas para o ambiente), comparar as condições reais de processo com as esperadas pelo projeto do sistema e, por fim, propor melhorias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Material Particulado*

O material particulado ou MP, sigla pelo qual é comumente descrito, pode ser definido como um conjunto de poluentes, tais como poeiras, fumaças, fumos ou qualquer outro tipo de material sólido e líquido que se mantenha em suspensão na atmosfera, devido à sua pequena dimensão (CETESB, 2020).

As partículas que constituem o MP geralmente possuem formatos irregulares, porém é bem comum terem seus tamanhos descritos em função do diâmetro, ou seja, considera-se que sejam esféricas. A forma irregular é descrita em termos do diâmetro equivalente. As duas definições mais utilizadas são o diâmetro aerodinâmico (d_a) e o diâmetro de Stokes. O diâmetro aerodinâmico é o diâmetro de uma esfera de densidade unitária (1 g/cm^3) que possui a mesma velocidade de sedimentação no ar que a partícula de interesse. Já o diâmetro de Stokes, pode ser definido como o diâmetro de uma esfera que possui a mesma densidade e a mesma velocidade de sedimentação da velocidade da partícula que está sendo avaliada (FINLAYSON-PITTS e PITTS, JR., 2000).

O tamanho das partículas é o principal fator a ser mencionado quando se trata do transporte do MP na atmosfera, uma vez que as partículas de maior tamanho sedimentam, devido à força da gravidade, num menor intervalo de tempo que partículas de tamanhos menores. Sendo assim, quanto maior o tamanho da partícula, menor será seu tempo de permanência na atmosfera (BRITO et al., 2018).

Pode-se classificar o material particulado de acordo com o seu diâmetro. Partículas inaláveis (MP_{10}) correspondem às partículas com diâmetro menores ou igual a $10 \text{ }\mu\text{m}$, e partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$) possuem diâmetros menores ou igual a $2,5 \text{ }\mu\text{m}$. Tem-se também a definição de partículas totais em suspensão (PTS), que compreendem às partículas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a $50 \text{ }\mu\text{m}$ (BRASIL, 2018). O tamanho da partícula varia de acordo com sua origem, que pode ser primária ou secundária. As de origem primária são geradas por emissões naturais (por exemplo, erupções vulcânicas e ressuspensão do solo em áreas de deserto), ou por emissões antropogênicas (como atividades industriais e combustão de combustíveis fósseis). Já as partículas de origem secundária, são formadas a partir de reações com outros componentes atmosféricos, podendo ser produzidas tanto por emissões antropogênicas de gases, quanto por emissões naturais (água do mar e processos de decomposição biológica) (ALMEIDA, 1999).

Dispersões gasosas existentes no ar, formadas por materiais particulados sólidos, líquidos ou microorganismos de diferentes tamanhos e formatos irregulares, podem ser chamadas de aerossóis, que possuem classificação de acordo com o tamanho apresentado pelas partículas (Tabela 1).

Tabela 1. Classificações dos diferentes tipos de aerossóis/contaminantes do ar e suas características

Classificação	Tamanho de partícula	Formação	Observações
Fumos	Partículas sólidas com diâmetro entre 1 e 10 μm .	Volatilização de materiais fundidos que se condensam. Podem oxidar.	Tendem a flocular no ar.
Poeiras	Partículas sólidas com diâmetro entre 1 e 100 μm .	Desintegração mecânica de substâncias inorgânicas ou orgânicas a partir de manuseio, britagem, moagem, peneiramento, fundição.	Não tendem a flocular e nem se difundem. Tendem a se precipitarem pela ação da gravidade.
Fumaça	Partículas com diâmetro menor que 1 μm .	Combustão incompleta de materiais orgânicos (carvão, óleo combustível, papel).	-
Névoas	Partículas líquidas com diâmetro entre 0,1 e 100 μm .	Condensação de vapor ou dispersão mecânica de líquidos criados a partir da nebulização ou pulverização.	-
Organismos vivos	Pólen das flores com diâmetro de partícula entre 5 e 10 μm . Esporos de fungos com diâmetro de partícula entre 1 e 10 μm . Bactérias com diâmetro de partícula entre 0,2 a 5 μm .	-	-
Fuligem	-	Queima de carvão e óleo combustível e presentes nos gases de combustão de Caldeiras e Fornalhas.	-

Fonte: (MACYNTIRE, 1990).

O tempo em que o material particulado permanece em suspensão pode ter duração de dias ou semanas, podendo assim, interferir quimicamente e fisicamente na atmosfera, não somente em escala local, mas também em escala regional e até global, já que há transporte do MP a longas distâncias por correntes de ar. Além de contribuírem para poluição atmosférica e serem prejudiciais à saúde da população, essas partículas podem

causar redução da visibilidade do local formando nevoeiros e acidificação das chuvas e solo, que consequentemente causam a degradação de monumentos (devido à formação de chuva ácida) (CASTANHO, 1999).

A remoção do material particulado se dá por deposição seca devido à ação da gravidade sobre as partículas ou por via úmida, devido à precipitação (geralmente em partículas localizadas dentro e abaixo das nuvens) (CASTANHO, 1999). Em algumas situações é interessante a utilização de equipamentos de controle de poluição (ECP) para remoção desses poluentes, como filtros de manga, ciclones, lavadores de gases, entres outros. Para um funcionamento e eficiência adequados, o dimensionamento desses equipamentos deve levar em consideração as características do material emitido e as variáveis envolvidas no processo em questão.

2.1.1 Riscos industriais causados pelo material particulado

Em indústrias, além dos impactos sociais e ambientais que a dispersão do material particulado pode causar, existe também o risco de explosão de pó. Uma das formas de evitar um acidente industrial por este motivo, é garantir que seus processos sejam limpos e seguros.

Pós são materiais combustíveis que quando dispersos no ar e em contato com uma fonte de ignição, queimam rapidamente e favorecem o potencial de explosão (CROWL, 2003). Este é agravado na presença conjunta de algumas características: a partícula deve possuir tamanho pequeno (geralmente, partículas menores apresentam maior área superficial, que em contato com o ar aumenta a taxa de combustão por massa de material), estar dispersa e em concentrações suficientes em um ambiente confinado, existir uma fonte de calor local e a presença de oxigênio (RABELO, 2020).

Nos processos industriais pode haver a deposição de materiais particulados sobre as superfícies quentes dos equipamentos, causando nestes um isolamento térmico que resulta num aumento de temperatura em suas superfícies, favorecendo à ignição das partículas ali depositadas. Nestes casos, o *housekeeping*, ou seja, as práticas regulares de limpeza em todas as superfícies das quais existam acúmulo de pó devem ser realizadas. É importante que estas práticas aconteçam durante paradas de planta ou eventos pontuais de parada dos equipamentos a fim de evitar qualquer contato com o calor existente na superfície (RABELO, 2020). A NFPA 654, *The National Fire Protection Association*, norma que padroniza práticas preventivas de explosões de pó em fabricação, processamento e manuseio de sólidos particulados combustíveis, prevê um plano obrigatório de limpeza e

propõe que as melhores técnicas são a aspiração do material, varredura ou lavagem com água. A sopragem e limpeza com ar comprimido deverá ser utilizada apenas em caso de ineficiência das primeiras opções ou caso estas favoreçam algum risco ao processo ou aos operadores presentes no local (OH&S, 2020) e (NFPA 654, 2013).

Outra técnica para evitar cenários de risco de explosão de pó são os sistemas de exaustão local (vácuo) e são os mais utilizados como método preventivo. Desta forma, é importante que ele seja bem projetado em todas as características que o compõe (RABELO, 2020).

2.2 Transporte Pneumático

O transporte pneumático tem como propósito o deslocamento de partículas sólidas de um ponto a outro, através da utilização usual de ar, nitrogênio ou vácuo. Trata-se de um método cada vez mais frequente nas indústrias, sendo estimada uma taxa de crescimento anual de 5,7 % entre 2019 e 2025 para o mercado global. A preocupação das indústrias frente à necessidade de trabalhar com sistemas mais eficientes energeticamente e à preservação da qualidade e higiene de seus produtos, além da satisfação de seus clientes, foram cruciais para maior demanda da utilização de diferentes tecnologias do transporte pneumático ao longo dos anos (GVR, 2020).

Essa operação unitária apresenta algumas vantagens como menor necessidade de manutenção do sistema, fácil controle operacional e diminuição da possibilidade de contaminação do produto transportado. Como desvantagem, pode ser citado a tendência à obstrução e desgaste nas tubulações, o que ocasiona maior perda de carga e consequentemente, maior consumo de energia, sendo recomendado que os materiais em transporte possuam baixo teor de umidade (máximo 20 %), reduzindo a probabilidade de que agreguem-se nas paredes da tubulação (COSTA, 2009). Desta forma, é crucial que o sistema seja bem projetado e atenda às especificações das propriedades das partículas, temperatura e pressão de transporte e velocidade de escoamento, além de conter uma quantidade mínima de acessórios, somente o necessário para o bom funcionamento da linha, gerando assim, menores perdas de carga e distúrbios no sistema (TEIXEIRA, 2019).

O sistema de vácuo é uma boa opção quando tem-se como objetivo realizar a captura de partículas em diferentes pontos e levá-las até um único destino ou quando deseja-se segurança, caso sejam transportadas partículas nocivas à saúde das pessoas ou até mesmo quando elas são propícias às condições de explosões de pó. A diferença entre este sistema e o de pressão positiva é a posição de instalação da máquina responsável por criar o

fluxo do transporte (TEIXEIRA, 2019). Na Figura 1 são ilustrados ambos os tipos de sistemas.

Figura 1. Comparação entre o arranjo e utilização dos transportes pneumáticos de pressão positiva e negativa



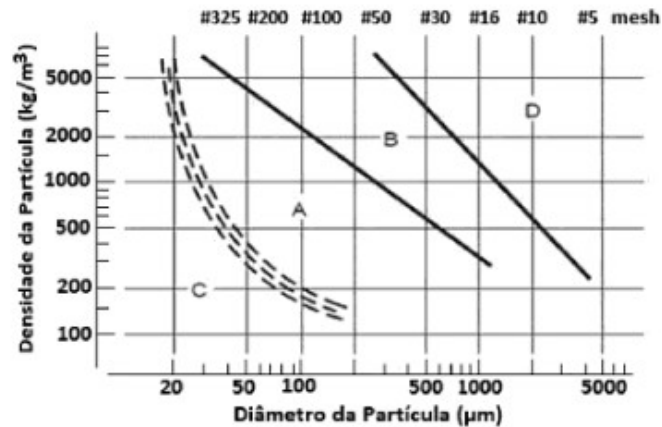
Fonte: (MAYNARD, 2010 apud TEIXEIRA, 2019).

A fase diluída pode ser operada em pressões positivas (máximo de 15 psig, equivalente à pressão atmosférica) e a vácuo. A velocidade do ar opera em uma faixa ampla de 15 a 40 m/s havendo exceções dependendo das propriedades do sólido. Ao mesmo tempo, a velocidade recomendada para uma boa operabilidade é de 22 a 28 m/s, pois abaixo do limite inferior pode haver entupimento na linha, enquanto que acima do limite superior, são geradas deformações nos sólidos, o que leva ao aumento da potência consumida pela máquina responsável pelo transporte. Além disso, opera com concentração de sólidos menor que 15 kg sólido/kg ar (TEIXEIRA, 2019).

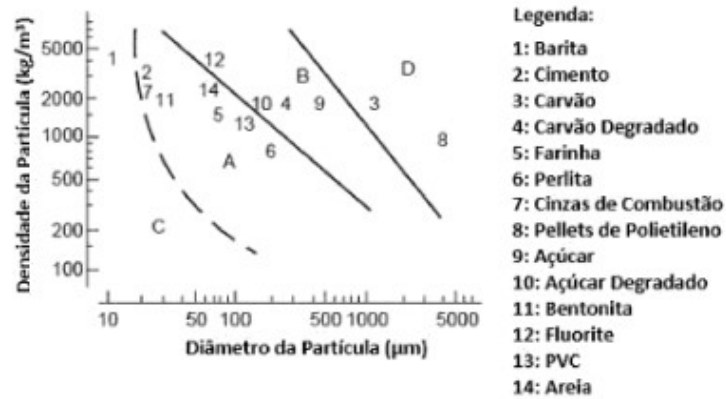
A fase densa é operada em pressões positivas entre 15 e 70 psig (de 1 a 4 barg) e a velocidade do ar recomendada é inferior à da fase diluída, entre 6 e 20 m/s. Pode-se trabalhar com uma alta concentração de sólidos, de 15 a 50 kg sólido/kg ar (TEIXEIRA, 2019).

2.2.1 Classificação e Diagrama de Geldart

De acordo com o Diagrama de Geldart, existem quatro diferentes classificações de partículas que ajudam a entender seus comportamentos inerentes ao transporte. Estas classificações têm como parâmetros a densidade e o diâmetro dos sólidos, como mostrado na Figura 2 (MILLS, 2004). A Figura 3 representa o diagrama adaptado de Geldart mostrando exemplos de sólidos em cada uma das classificações (TEIXEIRA, 2019).

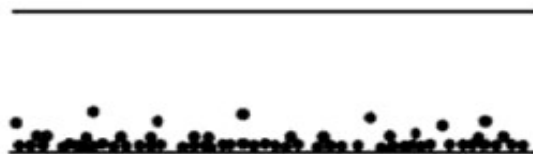
Figura 2. Diagrama de Geldart

Fonte: (MILLS, 2004).

Figura 3. Diagrama de Geldart adaptado

Fonte: (TEIXEIRA, 2019).

Partículas do grupo A possuem uma boa retenção ao fluido de transporte, ou seja, são capazes de continuar fluidizando por um tempo, mesmo após a breve parada do fluxo deste fluido motriz (CARVALHO, 2018). É um grupo que abrange partículas de até 1 mm de diâmetro e são adequadas ao transporte em fase densa *moving bed flow* no qual os sólidos escoam de forma ágil, deslizando na tubulação com grande interação entre si, como mostrado na Figura 4 (TEIXEIRA, 2019).

Figura 4. Regime de transporte Moving Bed Flow das partículas

Fonte: (DABIRIAN et al, 2016 apud TEIXEIRA, 2019).

Partículas do grupo B possuem um tamanho um pouco acima do grupo A, entre 0,05 mm e 5 mm e possuem baixa retenção ao fluido de transporte, ou seja, ao pará-lo há instantaneamente a parada do transporte e as partículas se depositam na tubulação (MILLS, 2004). Há recomendações de que a velocidade mínima de transporte opere em 16 m/s com uma razão de sólidos baixa e, desta forma, são partículas adequadas ao transporte em fase diluída, assim como as do grupo D. As partículas do grupo D possuem maiores diâmetros, acima de 5 mm e necessitam de maior vazão de ar como fluido de transporte (TEIXEIRA, 2019).

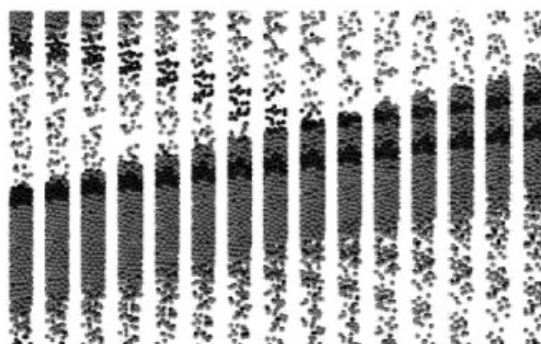
Partículas do grupo C são muito pequenas, abaixo dos 50 μm (0,05 mm), geralmente coesivas e abrasivas. Possuem alta tendência de acúmulo e penetração em curvas e trechos de tubulação, dificultando sua fluidização. São transportadas em fase densa do tipo *Slug Flow* (Figura 5) em tubulações horizontais ou *plug flow* (Figura 6), em tubulações verticais (MCNAMARA et al, 2006).

Figura 5. Regime de transporte “Slug Flow”



Fonte: (MCNAMARA et al, 2006).

Figura 6. Regime de transporte “Plug Flow”



Fonte: (MCNAMARA et al, 2006).

No regime de escoamento *Slug Flow*, forma-se uma camada de partículas maior acima de uma camada menor, tendo um comportamento de escoamento similar a uma “lesma”. Formam-se camadas como se fossem dunas em rápida movimentação ao longo da tubulação. Já o escoamento *Plug Flow* é bastante similar ao anterior, porém devido ao trecho de linha ser vertical, as partículas preenchem totalmente a tubulação e há maior tendência na formação de aglomerados pela junção de partículas que ascendem e as que caem por efeito gravitacional (MCNAMARA et al, 2006).

Conhecer as propriedades das partículas auxilia no pré-entendimento do comportamento das mesmas em escoamento, contribuindo desta forma, para definição das melhores condições de transporte em um projeto de transporte pneumático. Porém, um dos grandes desafios de um sistema como este é de fato tornar o projeto viável, uma vez que diferentes propriedades de um mesmo material, como por exemplo o tamanho, podem implicar grandes diferenças nas condições de transporte (MILLS, 2016 apud LOURENÇO, 2019). Além disso, alguns sistemas trabalham com diferentes tipos de materiais, nestes casos, recomenda-se a realização de testes experimentais de transporte pneumático em escala piloto, principalmente se houver a alteração dos materiais que serão transportados e o desejo for transportá-los em fase densa (MILLS, 2016 e PAN, 1999 apud LOURENÇO, 2019).

É importante citar que nem sempre as partículas mostram comportamentos coerentes com a classificação de Geldart. Existem materiais que trabalham nas faixas de transição do diagrama de Geldart e isso torna o problema ainda mais complexo (LOURENÇO, 2019).

2.2.2 Variáveis de processo que influenciam na eficiência do transporte

O transporte pneumático pode apresentar alguns problemas de operação dependendo dos principais fatores de processo: propriedade do sólido (como já mencionado no item 2.2.1), temperatura e pressão do transporte, velocidade de transferência das partículas, superfície interna da parede da tubulação e quantidade de acessórios instalados na linha. Tem-se uma maior cautela na velocidade de transporte, que implica na vazão do fluido motriz. É ideal que estas se mantenham baixas, em um valor ótimo, pois isso garante uma menor perda de carga distribuída, menores problemas de erosão das partículas, evita perdas de pressão as quais favorecem eventuais depósitos dos sólidos na tubulação e economiza energia do trabalho requerido pela máquina motriz do transporte. Para diminuir a velocidade, pode-se aumentar o diâmetro das tubulações e garantir o menor número possível de acessórios instalados (TEIXEIRA, 2019).

2.2.2.1 Velocidade real do sistema

É a velocidade na qual o equipamento responsável pela força motriz no sistema (compressor/ventilador) é dimensionado, ou seja, é a velocidade do transporte pneumático e é obtida pela equação da continuidade, conforme Equação (1) (TEIXEIRA, 2019):

$$V_{op} = \frac{\dot{m}_{ar}}{3600 \cdot A \cdot \rho} \quad (1)$$

Em que V_{op} é a velocidade do fluido que percorre o leito (m/s), \dot{m}_{ar} é a vazão mássica do fluido, geralmente o ar (kg/h), A é a área da seção transversal do leito (m²) e ρ é a densidade do fluido (kg/m³).

2.2.2.2 Velocidade de saltitação e velocidade mínima teórica

As equações de Rizk estabelecem parâmetros para encontrar a velocidade mínima, na fase diluída, que equivale à menor perda de carga no escoamento. A velocidade de saltitação é a velocidade na qual as partículas começam a se depositar nas paredes da tubulação. Já a velocidade mínima operacional recomendada teórica é 20 % maior que a velocidade de saltitação (TEIXEIRA, 2019). Elas podem ser calculadas pelas Equação (2) e Equação (3), respectivamente:

$$V_{min} = 1,2 \cdot V_{salt} \quad (2)$$

$$V_{salt} = \sqrt{g \cdot D} \cdot 10^{\frac{x}{y}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_s^{\frac{1}{y}}}{\dot{m}_{ar}} \right) \quad (3)$$

Sendo V_{min} a velocidade mínima para a fase diluída e V_{salt} a velocidade saltitação, ambas expressas em metros por segundo (m/s), D o diâmetro da tubulação (m), g a aceleração da gravidade (m/s²), \dot{m}_s a vazão mássica de sólidos (kg/h) e \dot{m}_{ar} a vazão mássica do ar (kg/h).

Os coeficientes x e y são expressos pelas Equação (4) e Equação (5), respectivamente (TEIXEIRA, 2019):

$$x = 1,44 \cdot d_p + 1,96 \quad (4)$$

$$y = 1,1 \cdot d_p + 2,5 \quad (5)$$

Onde d_p é o diâmetro da partícula expresso em milímetros (mm).

2.2.2.3 Velocidade da partícula

Na fase diluída, a movimentação das partículas em suspensão no ar é promovida pelo mecanismo de arrasto, sendo assim, a velocidade das partículas em relação a um referencial fixo será menor que a velocidade do fluido motriz (COSTA, 2009). A aproximação de Klinzing (1981) (TEIXEIRA, 2019) calcula esta propriedade, conforme apresentado na Equação (6):

$$V_p = V_{op} \cdot (1 - 0,004 \cdot d_p^{0,3} \cdot \rho_p^{0,5}) \quad (6)$$

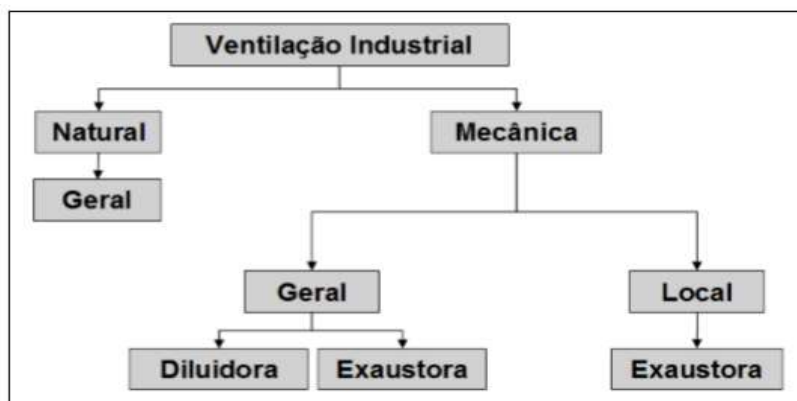
Em que V_p é a velocidade da partícula (m/s), d_p o diâmetro da partícula (mm) e ρ_p a densidade da partícula (kg/m^3).

O processo de medição deste parâmetro é difícil e complexo, sendo apenas mensurada para efeitos acadêmicos ou de pesquisa. Normalmente é referida apenas a velocidade do ar. Na direção horizontal, a velocidade das partículas pode ser considerada cerca de 80 % da velocidade do fluido e, na direção vertical ascendente, a velocidade das partículas pode ser considerada cerca de 70 % da velocidade do fluido (COSTA, 2009).

2.3 Ventilação Industrial

A ventilação industrial tem como objetivo realizar o controle da temperatura, umidade e distribuição do ar em um determinado ambiente, com a ação de deslocá-lo. Tem como princípio a renovação do ar, retirando-o ou fornecendo-o ao ambiente, e a eliminação de contaminantes ou poluentes (geralmente aerossóis), que são substâncias que excedem os índices normais de concentração e causam riscos maiores à saúde das pessoas que são expostas a ele durante um certo período de tempo (MACYNTIRE, 1990). Sua classificação pode ser feita como mostrado na Figura 7.

Figura 7. Classificação dos diferentes tipos de Ventilação Industrial



Fonte: (FURIERI, B. e CASTILHO, 2009).

A ventilação natural geral não necessita de recursos mecânicos para movimentar o ar, que é deslocado devido ao gradiente de pressão natural do ambiente (MACYNTIRE, 1990). Esse gradiente de pressão é intensificado com diferenças de temperatura existentes no meio e quando há pontos de aberturas dispostas de forma conveniente, como portas e janelas alocadas de formas opostas umas as outras (COSTA, 2005).

Já a ventilação mecânica tem como princípio a movimentação do ar obtida por diferenças de pressão criadas mecanicamente e é aplicada quando o meio não proporciona o índice de renovação do ar desejado ou quando a sua circulação natural é baixa. Ela é classificada em três diferentes tipos: geral diluidora, geral exaustora e local exaustora (FURIERI e CASTILHO, 2009).

Na ventilação geral diluidora, o ar exterior é enviado por ventiladores ao interior do ambiente, gerando uma mistura entre o ar renovado e o ar viciado. Com este fluxo de ar, a pressão interna do ambiente torna-se maior que a pressão externa, beneficiando a contínua renovação do ar que, em seguida, retorna para o meio externo, diluindo os contaminantes presentes. Tem-se como objetivo arejar melhor o ambiente, diluir contaminantes existentes (vapores, gases ou partículas) e retirá-los do meio, diminuir a temperatura do local e também impedir que ar contaminado de um outro meio penetre no meio em que é necessário ser ventilado (MACYNTIRE, 1990).

A ventilação geral exaustora é preferível à geral diluidora quando há uma maior contaminação no ambiente a que se deseja renovar o ar, como em oficinas, sistemas de moagem, ambientes com pó ou excessivamente quentes. Neste tipo de sistema, o ar interno é preferencialmente extraído do ambiente, permitindo que o ar exterior também adentre pelas aberturas, por insuflação. Neste caso, a pressão interna do ambiente torna-se menor que a pressão externa, a extração dos contaminantes é mais intensa e a quantidade de ar necessária para diluir os contaminantes é menor (COSTA, 2005).

Há também a ventilação mista que combina tanto ventilação por insuflação (geral diluidora) quanto por exaustão (geral exaustora), garantindo tanto o bom controle do ar que entra quanto a sua qualidade de distribuição no ambiente.

As vantagens das ventilações gerais, sejam elas diluidoras ou exaustoras, são a aplicação eficiente, quando as fontes geradoras de contaminantes encontram-se dispersas dentro do ambiente, e o menor custo de instalação. Por outro lado, as desvantagens são que os contaminantes, antes de atingirem o grau correto de diluição no ar, acabam afetando, em maior ou menor grau, a saúde das pessoas as quais encontram-se no local. Desta forma, quando os poluentes são gerados em grande quantidade e apresentam alto grau de contaminação ou toxicidade, é ideal que se utilize a ventilação local exaustora, que será descrita no tópico a seguir (MACYNTIRE, 1990).

2.4 Sistema de Exaustão

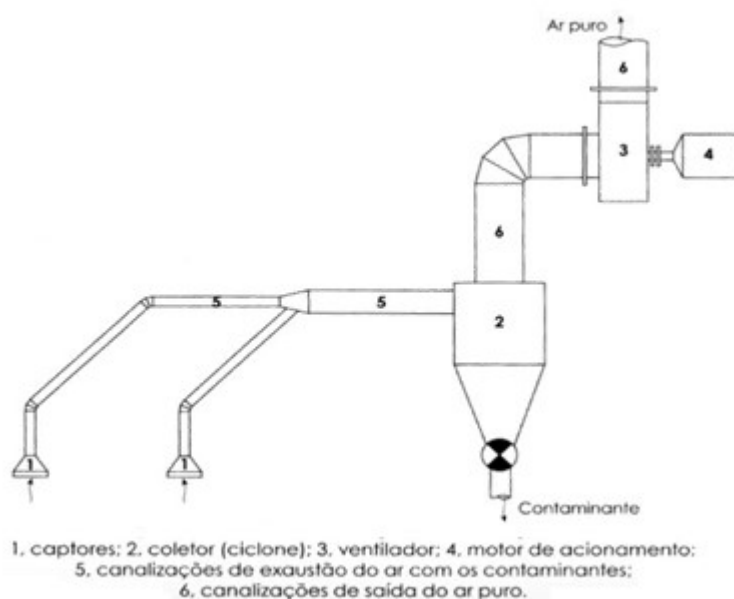
O sistema de exaustão local é aplicado em diversos processos industriais que necessitam capturar um contaminante no ponto em que é produzido, antes que ele se espalhe no ambiente. A vantagem deste método de captura de poluentes é a possibilidade do tratamento do ar por meio de equipamentos como filtros manga, ciclones e secadores, por exemplo (COSTA, 2005).

A corrente de ar que irá extrair os contaminantes de uma determinada parte do processo, ou seja, o ar aspirado, possui uma velocidade de captura adequada para possibilitar a ação eficaz do arraste das partículas para seu interior e evitar que esses poluentes se espalhem pelo ambiente. Trata-se de um sistema totalmente especializado e que atua em processos industriais, geralmente específicos, tais como cabines com jatos de areia ou pintura, aparelhos de solda, tanques para tratamento químico, misturadores, peneiras, esteiras, silos e ensacadeiras (COSTA, 2005).

Sistemas de exaustão local, no geral, são constituídos por alguns componentes, como mostrado na Figura 8 (FURIERI, B. e CASTILHO, 2009), e descrito a seguir:

- a) Captores: trabalham diretamente na coleta dos contaminantes desejados no ponto específico do processo;
- b) Rede de dutos: trechos de tubulação que interligam a saída do captor ao equipamento coletor;
- c) Coletor: equipamento responsável por separar a partícula contaminante do ar, a fim de purificá-lo. Geralmente, são utilizados ciclones ou filtros de mangas. Neste trabalho, será explorado o filtro de manga;
- d) Ventilador/Compressor: responsável por gerar a rarefação (vácuo) do sistema permitindo que as partículas contaminantes extraídas pelo captor sejam transportadas até o coletor.

Figura 8. Componentes de um sistema de exaustão local



Fonte: (COSTA, 2005).

2.4.1 Captores

Os captores são os instrumentos responsáveis pelo primeiro contato direto dos materiais particulados com o sistema de exaustão. O projeto desses equipamentos leva em consideração dois diferentes tipos de velocidade: velocidade de captura e velocidade mínima nos dutos. A velocidade de captura é a velocidade mínima requerida na fonte de emissão para que as partículas consigam ser levadas até a entrada do captor. Ela é encontrada na literatura e depende do tipo da fonte emissora. Se a fonte for, por exemplo, uma britadeira, peneira, ou esteira transportadora com alta velocidade (acima de 60 m/min), a velocidade de captura varia entre 1 à 2,5 m/s. Em sistemas de enchimentos de barris, varia entre 0,4 e 0,5 m/s, no ponto de enchimento (MACINTYRE, 1990). A velocidade de captura também é definida como um valor que impede a fuga das partículas em relação ao sistema de exaustão, ou seja, é a velocidade na qual elas são coletadas por completo (FURIERI, B. e CASTILHO, 2009).

Como dito, no conceito de transporte pneumático, sistemas com particulados devem operar próximos à velocidade mínima teórica para que a perda de carga seja pequena a ponto de não influenciar na sedimentação das partículas e consequente obstrução nas tubulações. Esta velocidade, do ponto de vista dos sistemas de exaustão, também pode ser definida de acordo com o tipo da fonte contaminadora. Para fontes do tipo *bins*, *Hoppers* e enchimento e esvaziamento de barris, a velocidade mínima do ar no duto é de 17,8 m/s (Anexos C e D). Para as fontes nas quais não se deseja fazer uma captação excessiva dos

particulados, pode-se optar em reduzir a vazão de ar no trecho, pois uma vazão excessiva causa maior perda do produto (ACGHI, 1998).

O tipo e formato do captor, tamanho, posição de instalação em relação à fonte emissora e a vazão de captação são conceitos essenciais para o dimensionamento do sistema de exaustão. A vazão de captação é calculada pela relação entre a velocidade de captura e a área aberta do captor. Quanto menor for a distância entre a fonte emissora e o captor e quanto menor a quantidade de frestas e áreas abertas ele apresentar, mais eficiente será a captação. As áreas abertas são definidas também no projeto do sistema (FURIERI, B. e CASTILHO, 2009).

2.4.2 Rede de dutos

A rede de dutos, que constitui o sistema de exaustão, é composta por tubulações dispostas para a condução de ar sob pressão pouco elevada, de forma a considerar desprezível a compressibilidade do ar, possibilitando a não ocorrência de fenômenos termodinâmicos que são verificados em linhas de vapor e de ar comprimido (MACINTYRE, 1990).

O dimensionamento dos condutos baseia-se na Equação da Continuidade (MACINTYRE, 1990), de forma a obter o valor da vazão pelo produto da área da seção normal aos filetes líquidos em escoamento pela velocidade média da mesma seção, Equação (7):

$$Q = S \cdot V \quad (7)$$

Sendo Q a vazão de ar, expressa em m^3/s , V a velocidade média de escoamento do ar em m/s , e S a área da seção transversal do duto, expressa em m^2 .

Os dutos podem possuir seção circular ou retangular. Sendo preferível, sempre que possível, a seção circular, uma vez que o formato não possui arestas, o que evita zonas de velocidade reduzida e consequentemente, a estagnação de contaminantes (COSTA, 2005). Substituindo na Equação (7) a área da seção circular e isolando-a para obtenção do cálculo do diâmetro tem-se a Equação (8):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} \quad (8)$$

Sendo D o diâmetro da tubulação, expresso em metros (m).

Para o cálculo do diâmetro pela Equação (8) é necessário o conhecimento da velocidade e da vazão do ar em cada trecho da tubulação, que são determinadas com base

nas especificações exigidas pelo sistema ou por métodos que fazem a relação direta entre as variáveis, através do conceito da conservação de massa, como exposto na Equação (7).

A velocidade do ar que escoar pelo sistema de tubulações deve possuir magnitude suficiente para garantir a suspensão (velocidade de flutuação) e o transporte das partículas (velocidade do material), simultaneamente. A velocidade de flutuação depende do peso específico e da granulometria das partículas, enquanto a velocidade do material depende do peso específico real deste. Na prática, é preferível que sejam selecionadas velocidades globais, que garantam simultaneamente ambos os objetivos (COSTA, 2005). Na Tabela 2 são apresentadas recomendações feitas pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) para velocidade do ar em canalizações, de acordo com o material contaminante em suspensão.

Tabela 2. Velocidade do ar em canalizações segundo a ASHRAE

Material	V (m/s)
Vapores, gases, fumos, poeiras muito finas ($< 0,5 \mu\text{m}$)	10
Poeiras secas finas	15
Poeiras industriais médias	17,5
Partículas grossas	17,5 a 22,5
Partículas grandes, materiais úmidos	$> 22,5$

Fonte: (ASHRAE apud COSTA, 2005).

Dutos, de forma geral, podem ser constituídos por diversos materiais, como chapas de aço galvanizado, de aço inoxidável, de alumínio semiduro, de cobre, de aço recobertas com chumbo, de chumbo, de cimento amianto, entre outros. Mas em sistemas de exaustão são geralmente feitos de chapas de aço preta, soldadas ou chapas de aço galvanizada, quando se trata de trabalho sob temperaturas inferiores a 200 °C. A espessura adotada irá depender de alguns fatores, como a presença ou ausência de materiais corrosivos, o diâmetro da canalização e o material contaminante a ser transportado. Já as curvas, ângulos, conexões e captos devem ser produzidos com chapa de bitola dois pontos mais espessa que a do duto correspondente (COSTA, 2005).

2.4.3 Máquinas de fluxo

Devido à necessidade de escoamento do ar e movimentação das partículas ao longo dos componentes que constituem o sistema de exaustão, sopradores devem ser empregados. Esses equipamentos transferem energia recebida do meio externo (normalmente motor ou

turbina) ao fluido veiculado, visando aumentar seu estado de energia interna (MECABÔ, 2007).

Máquinas de fluxo que operam com valores para razão de compressibilidade abaixo de 1,2 podem ser classificadas como ventiladores ou sopradores (TEIXEIRA, 2019). Esses equipamentos provocam o deslocamento do ar devido à rotação de um rotor dotado de pás adequadas, acionado por um motor, em geral o elétrico. A energia mecânica do rotor é transformada em energia potencial de pressão e energia cinética, ou seja, energia que o fluido é capaz de assumir (no caso, ar ou gases), podendo assim, vencer as forças que se opõem ao seu deslocamento e escoar entre os dutos que constituem o sistema, proporcionando assim, a vazão desejável de ar para a finalidade em questão (MACINTYRE, 1990).

Os ventiladores apresentam características próprias de fabricação e suas especificações são selecionadas de acordo com as exigências do sistema no qual o mesmo será empregado. Alguns pontos que devem ser considerados são: grande ou baixa carga de partícula em circulação, necessidade de ausência de ruídos, velocidade e potência necessárias, pressão e vazão de atuação. Segundo Macintyre (1990), os ventiladores podem ser classificados de acordo com alguns critérios, sendo os mais usuais:

- a) Nível energético de pressão que estabelecem: baixa pressão (até 200 mmH₂O), média pressão (200 a 800 mmH₂O), alta pressão (800 a 2.500mmH₂O) e altíssima pressão (2.500 a 10.000 mmH₂O);
- b) Modalidade construtiva: centrífugos, hélico-centrífugos e axiais;
- c) Forma das pás: pás radiais retas, pás inclinadas para trás, inclinadas para frente e pás curvas de saída radial;
- d) Número de entradas de aspiração no rotor: entrada unilateral (simples aspiração) e entrada bilateral (dupla aspiração);
- e) Número de rotores: simples estágio (um rotor) e duplo estágio (dois rotores).

Para máquinas de fluxo que operam com valores para razão de compressibilidade acima de 1,2 tem-se os compressores (TEIXEIRA, 2019), que podem ser classificados como compressores de deslocamento positivo (volumétricos) e compressores de fluxo (dinâmicos ou turbos).

Nos compressores do tipo volumétrico, o volume é reduzido por ação mecânica, podendo se dar através do movimento de um êmbolo (compressores alternativos) ou engrenagens, palhetas e lóbulos (compressores rotativos), ocasionando a compressão do gás, que ocorre em um espaço confinado (MECABÔ, 2007).

Segundo Valadão (2002) para os compressores dinâmicos o aumento da energia se dá através da ação dinâmica de palhetas ou impulsos rotativos (impelidores), que imprimem velocidade ao fluido de trabalho e, posteriormente, através da ação do difusor, elevam a pressão do gás variando a velocidade do mesmo. Nesta categoria estão incluídos os compressores centrífugos e os axiais (apud ABREU, 2015).

O transporte pneumático em fase diluída é marcado pela utilização dos ventiladores, sopradores e compressores de lóbulos. Esses equipamentos atuam a pressões positivas e negativas, e apresentam maior eficiência que os ventiladores em situações de razão de compressibilidade moderada abaixo de 1,1, mas se classificam como os de maior eficiência em razões de compressibilidade entre 1,2 e 2 (TEIXEIRA, 2019).

Segundo Macintyre (1990), a potência necessária para realizar o transporte, quando o compressor aspira no final do transportador ou quando o ventilador sopra através do sistema, pode ser calculada pela Equação (9):

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_u}{\eta} \quad (9)$$

Onde N é a potência do ventilador ou compressor (cv), γ o peso específico do ar, que é igual a 1,2 kgf/m³ na temperatura ambiente de 20°, η o rendimento total do ventilador, dado pela razão entre a potência ganha pelo fluido e a potência mecânica (potência fornecida pelo motor ao eixo do rotor do ventilador) e H_u (m coluna de ar) a energia total ganha pelo fluido, dada pela Equação (10):

$$H_u = \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} \right) \quad (10)$$

Onde $p_1 - p_2$ é a diferença de pressão entre os pontos 1 e 2 (selecionados de acordo com o sistema a ser analisado), V_1 a velocidade no ponto 1 (m/s), V_2 a velocidade no ponto 2 (m/s) e g a aceleração da gravidade (m/s²).

Considerando a não variação do diâmetro, ou seja, que $V_1 = V_2$, temos para a potência, dada em cv:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta p}{75 \cdot \eta} \quad (11)$$

Onde Δp é a diferença entre as pressões nos pontos 1 e 2 (kgf/m²).

2.4.4 Filtro manga

O ar utilizado no processo deve ser liberado na atmosfera ambiente purificado, sem que ofereça qualquer tipo de risco à saúde das pessoas, danos ambientais ou inconvenientes,

como, por exemplo, a diminuição da visibilidade no local. Sendo assim, faz-se necessária a coleta do ar e posterior eliminação do material particulado. Esse procedimento pode ser efetuado com utilização de diversos equipamentos, sendo um deles, o filtro de pano, que consiste na utilização de um tecido, que pode vir a ser usado sob diversas formas, como meio poroso para detenção das partículas (ação de filtração). Seus rendimentos, no geral, superam 93 %, podendo chegar, em alguns casos, a 99,9 % (MACINTYRE, 1990).

Diferentes tecidos podem ser utilizados na fabricação desses filtros, e a escolha do material varia de acordo com a temperatura do meio, a agressividade dos poluentes e o caráter ácido ou alcalino da mistura do ar com as partículas. Os mais comumente utilizados são o algodão e a lã, que só podem ser usados até temperaturas de 82 a 90 °C, respectivamente, e para ar seco. Contudo, materiais como o náilon, o nomex, o dacron, o orlon, poliéster, polipropileno, fios metálicos, fibra de vidro e outros, também podem ser utilizados (MACINTYRE, 1990).

Os filtros de tecido sob a forma de mangas são os equipamentos mais antigos, simples e de alta eficiência, amplamente utilizados em indústrias dos mais diversos segmentos, para a remoção de partículas sólidas de correntes gasosas. Além de apresentar altas eficiências na remoção de partículas de até 0,1 μm , esses equipamentos removem uma parcela significativa das partículas de 0,01 μm (THEODORE, 2008).

As mangas que constituem o meio filtrante possuem uma forma alongada, tubular, e as estruturas onde são instaladas podem ser designadas como “baghouses”. O número de sacos utilizados pode variar bastante, desde números abaixo de uma dúzia até números que atingem a casa dos milhares, de modo a conseguir a área de filtração necessária. Frequentemente, quando a quantidade de mangas empregadas é relativamente alta, as “baghouses” são compartimentalizadas para que seja possível efetuar a limpeza sem que todo processo precise ser interrompido (THEODORE, 2008).

Devido à coleta do material particulado, tortas se formam nas mangas de tecido, sendo necessária sua remoção, que se dá por gravidade ou por meios mecânicos (THEODORE, 2008). Para alguns tipos de filtros a remoção pode ser feita por agitação ou raspagem das mangas, manual ou mecanicamente, após a interrupção da passagem do ar.

O material particulado também pode ser removido pela utilização do mecanismo de jato reverso ou pelo colapso das mangas. Para limpeza por jato reverso, emprega-se um tubo circular dotado de orifícios, que sobe e desce ao longo das mangas, injetando ar de fora para dentro. As impurezas removidas são coletadas na parte inferior do funil de captação. A velocidade de passagem de ar através do pano é da ordem de 5 m/min, e a

perda de pressão é de 10 a 15 cmH₂O. Já o colapso das mangas, consiste na indução da queda da poeira, por meio de diferenciais de pressão (MACINTYRE, 1990).

2.5 Perda de Carga

O escoamento do ar contaminado tem relação direta com a perda de carga do sistema (queda de pressão), pois além da resistência que os dutos oferecem à movimentação do fluido, há atrito e choque das partículas com as paredes das tubulações e outras partículas. As unidades de perda de carga são comumente expressas em pressão.

Segundo Gomide (1983), a perda de carga total por atrito, por unidade de comprimento, em um transporte pneumático (mmca/m) pode ser dada pela Equação (12), para os trechos horizontais:

$$\frac{\Delta P}{L_t} = 1,68 \cdot (X + 3,5) \cdot \frac{V^{1,8}}{D^{1,2}} \quad (12)$$

Sendo ΔP a perda de carga por atrito nos dutos do transportador (mmca), L_t o comprimento total da tubulação (m), X a fração em peso de sólidos transportados (kg sólidos/kg ar), V a velocidade de transporte (m/s) e D o diâmetro do duto (mm).

Tendo o conhecimento da capacidade do sistema C (t/h), calculada pela Equação (13), e da vazão de escoamento Q (m³/s), é possível calcular a fração de sólidos transportados, para o ar a 20° e 1 atm, pela Equação (14) (GOMIDE, 1983):

$$C = \left(\frac{D \cdot V^{0,98}}{3016} \right)^2 \quad (13)$$

$$X = \frac{C}{4,29 \cdot Q} \quad (14)$$

Para os trechos verticais a perda de carga poderá ser adotada como sendo o dobro da perda para um trecho horizontal de mesmo comprimento e com a mesma concentração de sólidos. Para efeito de cálculo pode ser utilizada a Equação (12) em ambas as situações (trechos verticais e horizontais), porém o comprimento dos trechos verticais deverá ser multiplicado por dois (GOMIDE, 1983).

Sendo assim, o comprimento total (L_t) deverá ser calculado pela soma dos trechos horizontais (L_h), o dobro do comprimento dos trechos verticais ($2 \cdot L_v$) e o comprimento equivalente às curvas e conexões (L_e), como mostrado na Equação (15). Sendo todos expressos em metros (GOMIDE, 1983).

$$L_t = L_h + 2 \cdot L_v + L_e \quad (15)$$

Os comprimentos equivalentes aos acessórios empregados nas tubulações podem ser encontrados no Anexo A, que relaciona este parâmetro com o diâmetro do duto de transporte.

Para estimar a perda de carga por aceleração ΔP_a (mm ca) do material nos trechos horizontais utiliza-se a Equação (16) (GOMIDE, 1983):

$$\Delta P_a = 0,138 \cdot \varphi \cdot X \cdot V^2 \quad (16)$$

Sendo φ o fator de redução da perda de carga por aceleração, que é variável e dependente do tipo de transporte empregado. Quando a alimentação de sólido do sistema é feita após o ventilador, o fator de redução adotado deve ser igual a 1, e menor que 1 se o material passar pelo ventilador. Para sistemas pneumáticos, onde a alimentação de sólidos acontece antes do ventilador, utiliza-se φ igual a 0,5. Há também um terceiro caso, onde o fator de redução adotado é igual a 0, usualmente empregado em transportes em que a alimentação é feita nas imediações da boca de aspiração (GOMIDE, 1983).

A perda de carga total é calculada pela soma de todas as perdas por atrito, por aceleração e nos demais equipamentos do sistema (silos, câmaras de poeira, ciclones, filtros, junções, Venturi, entradas e saídas de ar). Efetuando essa operação e multiplicando o resultado final por 10^{-4} é possível obter a perda de carga total ΔP_t em kgf/cm², como apresentado na Equação (17) (GOMIDE, 1983):

$$\Delta P_t = \left[1,68 \cdot L_t \cdot (X + 3,5) \cdot \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \cdot \varphi \cdot X \cdot V^2 + \Delta P_e \right] \cdot 10^{-4} \quad (17)$$

Sendo ΔP_e a perda de carga a perda de carga nos equipamentos (mmca).

Na Tabela 3 são apresentados alguns equipamentos coletores e suas respectivas perdas de carga geradas.

Tabela 3. Equipamentos de coleta (Perdas em mmca)

Equipamento de coleta	Perda de carga (mmca)
Câmara gravitacional	20 a 40
Ciclone comum	30 a 60
Ciclone de alta eficiência	70 a 150
Câmaras de empactação	40 a 100
Filtros de tecidos	80 a 150

Fonte: GOMIDE (1983).

A perda de carga nos captosres ΔP_c (mmca) não é expressa no equacionamento apresentado anteriormente, porém existe e pode ser calculada pela Equação (18) MACINTYRE (1990):

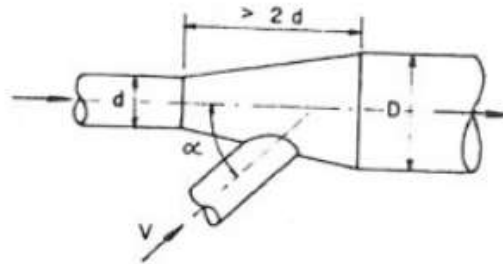
$$\Delta P_c = \frac{(1 - C_e^2)}{C_e^2} \cdot \frac{V^2}{16,34} \quad (18)$$

Sendo C_e o coeficiente de entrada (adimensional).

O coeficiente de entrada pode ser calculado pela razão entre a vazão real e a vazão teórica, mas também pode ser encontrado tabelado para vários formatos de captosres, como mostrado no Anexo B.

No sistema de tubulações do transporte pneumático podem haver dutos que recebem contribuição de outros ramais, no caso, as derivações. Na Figura 9, é apresentado um exemplo para melhor entendimento.

Figura 9. Ramo secundário (derivação)



Fonte: MACINTYRE (1990).

Para determinar de forma individual a perda correspondente à esse tipo de peça, calcula-se a altura representativa da velocidade h_v (mmca), ou seja, a pressão dinâmica, conforme Equação (19) (MACINTYRE, 1990):

$$h_v = \frac{V^2}{16,34} \quad (19)$$

E então consultam-se tabelas adequadas, onde, para cada tipo de peça, se encontra um coeficiente K (adimensional), que, multiplicado pela pressão dinâmica, fornece a perda de carga (p) em mmca, isto é:

$$p = K \cdot h_v \quad (20)$$

Para o tipo de derivação apresentado na Figura 9, os valores para o coeficiente K são apresentados na Figura 10.

Figura 10. Valores para K tabelados

α°	K
15°	0,09
20°	0,12
30°	0,18
45°	0,28
50°	0,32
60°	0,44
90°	1,00

Fonte: MACINTYRE (1990).

Para determinação das especificações do ventilador a ser utilizado, é necessário o conhecimento da perda de carga de todo o sistema, para isso calcula-se a perda em cada um dos trechos definidos e nos pontos de junções faz-se a comparação da perda de carga nos trechos que antecedem esse ponto, adotando o maior valor. Faz-se esse raciocínio de cálculo para encontrar as perdas de cargas em cada ponto de junção até que seja possível quantificar a perda de carga na entrada dos exaustores, local cuja indicação representa a perda de carga total do sistema (MACYNTIRE,1990).

3. METODOLOGIA

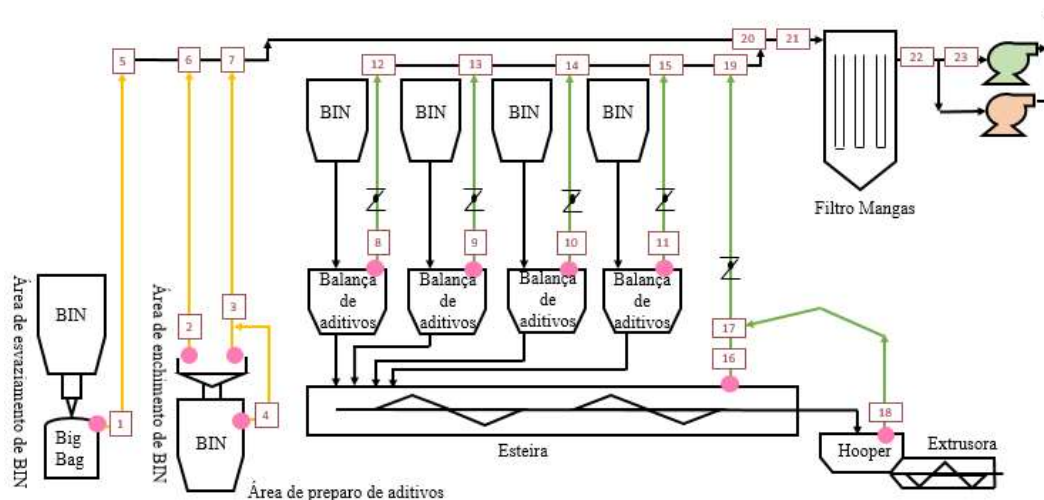
3.1 Descrição do processo estudado

O sistema de exaustão local estudado está presente em uma planta industrial, localizada no Grande ABC Paulista, produtora de resinas termoplásticas. Estas resinas (polipropileno e polietileno, por exemplo) são produzidas através de reações de polimerização, tendo como principais reagentes o propeno, propano, eteno, etano e hidrogênio. O produto formado nos reatores tem formato de pequenas partículas (pó) que passam pelas seguintes etapas: desativação catalítica, primeira secagem, extrusão, segunda secagem, armazenamento e ensaque. A área de extrusão contém outros sistemas periféricos necessários no processo e é onde o sistema de exaustão local está instalado.

O sistema de exaustão local atua no topo de equipamentos específicos das áreas de manipulação, armazenamento, transporte e mistura de aditivos sólidos e na entrada da máquina extrusora. O fluxograma do processo encontra-se na Figura 11 e representa o contexto do estudo, identificando os equipamentos presentes. As linhas representadas em amarelo são pontos de exaustão que não operam de forma contínua, ou seja, o preparo, carregamento e esvaziamento dos *bins* são trabalhos realizados em momentos pontuais,

exigindo pontualmente do sistema de vácuo. As linhas representadas em verde identificam os pontos de exaustão contínuos, ou seja, que estão sempre exigindo do sistema de vácuo.

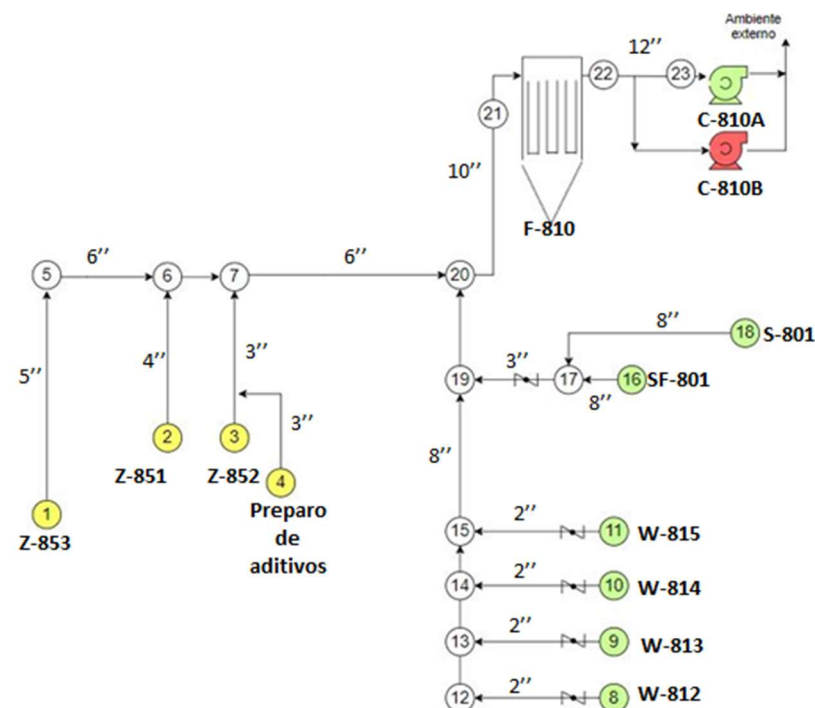
Figura 11. Fluxograma geral do processo



Fonte: Próprio autor.

A Figura 12 mostra um fluxograma mais simples do sistema de exaustão local, indicando os diâmetros das tubulações de cada trecho e seguindo o mesmo padrão de cores (amarelo são pontos de exaustão que não operam de forma contínua e verde se referem aos pontos de exaustão contínuos).

Figura 12. Fluxograma específico do sistema de Exaustão local



Fonte: Próprio autor.

Os aditivos inicialmente presentes em *big bags* ou sacarias são manipulados na área de enchimento de *bins*, que são *containers* metálicos que armazenam os aditivos a serem utilizados posteriormente na dosagem do pó de polipropileno. Esta área possui três pontos de exaustão, sendo dois deles instalados nos locais de preparo dos *bins* (#2 e #3) e um, instalado em contato direto com o *bins* (#4) para diminuir as formações de nuvens de pó durante estas ações operacionais de enchimento. Após o enchimento dos *bins*, eles são deslocados via elevador até o topo das balanças dosadoras de aditivos, cuja função é realizar uma dosagem controlada dos aditivos no processo. Entre a balança e o *bin* existe o controle para manter o nível da balança. Se o nível diminui, a válvula inferior do *bin* abre e o aditivo é descarregado na quantidade necessária. Os pontos de exaustão deste sistema são identificados pelos pontos #8, #9, #10, #11. Após descarregamento dos aditivos nas balanças, os *bins* são completamente esvaziados em um local específico. O *bin* é acoplado a uma balança com travas e selo inflável para evitar vazamento de pó para o ambiente, onde também há um ponto de exaustão (#1). Seguindo no processo, os aditivos presentes nas balanças dosadoras são enviados, de forma controlada, para a esteira, rosca transportadora, onde ocorre uma pré-mistura entre os aditivos e o pó de polipropileno, proveniente da polimerização, e os envia até o *hopper* da extrusora. O *hopper* tem como função comportar os aditivos e o pó de polipropileno pré-homogeneizados a serem enviados para a extrusora, a qual iniciará a última etapa de formação do produto final. Tanto a esteira, quanto o *hopper* possuem pontos de exaustão (#16 e #18, respectivamente) que se interligam em um ponto comum (#17).

Todos os pontos de exaustão local destinam os materiais particulados captados via rede de dutos (#5, #6, #7, #8, #12, #13, #14, #15, #19, #20, #21) para um filtro de mangas responsável pela coleta e retirada, purificando o ar a ser descarregado no ambiente após sair do filtro (#22 e #23) e que passa por dois compressores, sendo que um trabalha na reserva do outro. Existem válvulas reguladoras manuais nas linhas de exaustão do topo das balanças dosadoras de aditivos e também do topo da esteira, após conexão com a linha do *hopper*.

Em relação a instrumentos de medição, o sistema de exaustão é deficiente. Não existem medições de vazão, por exemplo. Em relação à medição de pressão, existem dois manômetros locais instalados à jusante dos exaustores, que impossibilitam quantificar a perda de carga do sistema e pontuar se o sistema está ou não obstruído. Desta forma, para este trabalho foram utilizados dados de vazão, pressão e capacidade do sistema/equipamentos descritos pelo projeto.

3.2 Dados do Processo

3.2.1 Material particulado

Grande parte do material particulado captado nos pontos do sistema de exaustão é composto por aditivos. Em 2019, o portfólio de aditivos foi alterado, ou seja, novos e diferentes produtos passaram a fazer parte do sistema. O atual portfólio de aditivos utilizado é diversificado, porém, cinco deles exigem maior frequência de drenagem do filtro de mangas (2, 4, 5, 19 e 20). As características dos aditivos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Características físicas dos materiais particulados do processo (aditivos)

Aditivos	Densidade Aparente	Granulometria	Umidade	Como é a Fluidez do Material?		Como é o Comportamento do Material?			
	kg/m ³	µm	%	Boa	Ruim	Tende a formar ponte	Adesivo (nas paredes)	Coesivo (entre si)	Higroscópico
Aditivos atuais	1	580	500	-	X			X	X
	2	350	500 a 3000	-		X	X		
	3	400	20	<1		X	X		
	4	230	44	< 3	X				
	5	450	0,5	-	X			X	
	6	700	40	<1,5	X	X	X		X
	19	200	10	0,0823	X	X	X		X
	20	130	2,5	<0,5	X	X	X		X
Aditivos antigos	7	620	200	< 0,5	X				
	8	480	200	< 0,5	X				
	9	480	200	-	X				
	10	480	200	-	X				
	11	450	4000	< 0,5	X				
	12	400	200	-	X				
	13	450	200	< 0,5	X				
	14	420	4000	< 0,5	X				
	15	450	4000	< 0,5	X				
	16	624	4000	0,12	X				
	17	450	4000	< 0,5	X				
	18	470	4000	< 0,5	X				

Fonte: Empresa.

3.2.2 Vazões de escoamento e especificações das tubulações

Conforme item 3.1, o sistema de exaustão é carente de instrumentos de medição e acompanhamento das variáveis de processo. Desta forma, para os cálculos deste trabalho, foram levantados os dados de duas formas distintas: dados de projeto, obtidos em isométricos de processo e folhas de dados e dados reais, baseados nos diagramas de tubulação e de instrumentação (*P&ID*) atualizados, isométricos e fotos tiradas das áreas.

Os dados de projeto são as vazões volumétricas e os diâmetros de tubulação por trecho (expostos na Tabela 5), pressão, potência e capacidades dos exaustores e do filtro mangas (seção 3.2.3).

Os dados reais são os tipos e quantidades de acessórios instalados em cada trecho, bem como os comprimentos das tubulações. Estes dados estão expostos na Tabela 6.

3.2.3 Equipamentos do sistema de vácuo

As especificações e capacidades dos filtros de mangas e compressores foram obtidos a partir de suas folhas de dados.

Filtro de Mangas:

- Tamanho do material particulado permitido: de 1 a 1000 μ m;
- Capacidade: 3950 m³/h;
- Diferencial de pressão permitida: 0,005 a 0,015 barg;
- Consumo de ar: 7 Nm³/h.

Compressores:

- Capacidade: 3950 m³/h;
- Pressão: -500 mmH₂O, equivalente a -0,05 barg;
- Pressão de projeto: 0,06 barg;
- Potência instalada: 11 kW;
- Potência absorvida: 8 kW;
- Rendimento: 0,73.

3.2.4 Identificação dos problemas de processo

O sistema de exaustão possui como principais desvios operacionais as constantes obstruções nas tubulações, principalmente nos trechos 16-17 e 17-19 (ponto de exaustão da esteira), as super exaustões e a liberação dos materiais particulados para o ambiente em alguns pontos de captação.

Tabela 5. Vazões e diâmetros de processo (projeto e real)

Trecho	DADOS DE PROJETO			DADOS REAIS	
	Vazão de projeto (m³/h)	Diâmetro de projeto (mm)	Diâmetro de projeto (in)	Diâmetro Real (in)	Diâmetro Real (mm)
1 ao 5 (captação)	800	120,0	4,72	5	127
2 ao 6 (captação)	250	76,1	3,00	4	102
3 ao 7 (captação)	800	120,0	4,72	3	76,2
4 ao 3 (captação)	296	Foi instalado como melhoria de processo. Vazão estimada	-	3	76,2
5 ao 6	800	133,0	5,24	6	152
6 ao 7	1050	133,0	5,24	6	152
7 ao 20	2146	133,0	5,24	6	152
8 ao 12 (captação)	200	60,3	2,37	2	50,8
9 ao 13 (captação)	200	60,3	2,37	2	50,8
10 ao 14 (captação)	200	60,3	2,37	2	50,8
11 ao 15 (captação)	200	60,3	2,37	2	50,8
12 ao 13	200	170,0	6,69	8	203
13 ao 14	400	170,0	6,69	8	203
14 ao 15	600	170,0	6,69	8	203
15 ao 19	800	170,0	6,69	8	203
18 ao 17 (captação)	100	33,7	1,33	8	203
16 ao 17 (captação)	150	Não consta no isométrico	-	8	203
17 ao 19 (captação)	250	Não consta no isométrico	-	3	76,2
19 ao 20	1050	170,0	6,69	8	203
20 ao 21	3196	273,0	10,7	10	254
21 ao Filtro	3196	323,9	12,8	10	254
Filtro ao 22	3196	457,0	18,0	12	305
22 ao 23	3196	360,0	14,2	12	305

Fonte: Empresa.

Tabela 6. Acessórios e comprimento das tubulações

Trecho	ACESSÓRIOS					COMPRIMENTO DE LINHA (M)		
	Curva	Cotovelo	Tê	Válvula (Borboleta/regulagem)	Outros	L vertical total (m)	L horizontal total (m)	L total (m)
1 ao 5 (captação)		4	1	1		5	4	9
2 ao 6 (captação)		2		1		2	3	5
3 ao 7 (captação)		2	1	1		3	2	5
4 ao 3 (captação)	2	2	1			3	0	3
5 ao 6						0	4	4
6 ao 7						0	1	1
7 ao 20		1				7	30	37
8 ao 12 (captação)	1	2		1		2	2	4
9 ao 13 (captação)	1	2		1		2	2	4
10 ao 14 (captação)	1	2		1		2	2	4
11 ao 15 (captação)	1	2		1		2	2	4
12 ao 13						0	2	2
13 ao 14						0	2	2
14 ao 15						0	2	2
15 ao 19						0	6	6
18 ao 17 (captação)					2 flanges soltos + "V" de 60° + mangote "solto" na saída do hopper	9	0	9
16 ao 17 (captação)						1	0	1
17 ao 19 (captação)		3				1	2	3
19 ao 20	1	1				0	3	3
20 ao 21		3				12	15	27
21 ao Filtro						0	1	1
Filtro ao 23	1	2				8	0	8

Fonte: Empresa.

3.3 Descritivo dos cálculos

Após a coleta dos dados (características qualitativas dos aditivos, diâmetro e comprimento das tubulações, quantidade e tipos de acessórios instalados nos trechos, diâmetros das linhas e vazões de projeto e potência dos exaustores) e adoção de algumas considerações (fluido incompressível e válvulas manuais com abertura de 50%), seguiu-se com a efetuação dos cálculos, feitos por meio do software Excel, onde foram implementadas as formulações, como especificado nesta seção.

Como descrito anteriormente no item 3.2.2, o sistema possui diversos trechos, com diferentes vazões e diâmetros. A partir dos dados expostos na Tabela 5, foi possível, com a utilização da equação da continuidade (Equação 7), o cálculo da velocidade nesses trechos.

Após a obtenção das velocidades, com o intuito de definir a perda de carga resultante em todo o sistema, foi necessário, inicialmente, determinar a perda de carga total em cada um dos trechos, seguindo a sequência de cálculos descrita a seguir.

Para o cálculo da capacidade do sistema, da fração de sólidos transportados e do comprimento total dos trechos empregou-se as Equações 13, 14 e 15, respectivamente. Os comprimentos dos trechos horizontais e verticais, bem como a quantidade e tipo de acessórios estão expostos na Tabela 6.

Com o conhecimento do diâmetro real e do tipo de acessório foi possível encontrar um valor correspondente para o comprimento equivalente no Anexo A. Para as curvas, cotovelos, válvulas e têes foram adotados os valores das colunas “Curva 90° R/D – 1 ½”, “Cotovelo 90° raio longo”, “Registro de ângulo aberto” e “Tê saída bilateral”, respectivamente. Para definição do comprimento equivalente total de cada trecho de tubulação, bastou somar os valores para comprimento de cada um dos acessórios contidos no mesmo. Na Tabela 7, além do valor para comprimento equivalente total de cada trecho são apresentados os valores para comprimento equivalente correspondente aos acessórios. O fator φ (fator de redução) adotado é igual a 0,5, como recomendado por GOMIDE (1983) para sistemas pneumáticos onde a alimentação de sólidos acontece antes do ventilador, e a perda de carga do filtro manga, único equipamento empregado, é igual ao valor médio do intervalo dado para “Filtros de tecidos” na Tabela 3. A detenção de todos esses valores possibilitou o cálculo da perda de carga devido ao atrito, à aceleração, aos acessórios e demais equipamentos, utilizando a Equação 17.

Como essa formulação não abrange a perda de carga nos captores, a mesma foi calculada pela Equação 18, sendo o coeficiente de entrada (C_e) definido de acordo com o

tipo do captor no Anexo B (0,63 para os trechos 1-5, 2-6, 3-7 e 4-3, 0,49 para os trechos 9-13, 10-14, 11-15 e 16-17 e 0,82 para o trecho 18-17). A perda de carga nas junções também precisou ser calculada separadamente, utilizando a Equação 20, onde a altura representativa da velocidade h_v foi calculada pela Equação 19 e os valores para coeficiente K adotados de acordo com o recomendado na Figura 10, sendo igual a 0,18 para os pontos de junção dos trechos 8-12, 9-13, 10-14 e 11-15, 0,28 para os pontos dos trechos 2-6, 3-7 e 19-20 e 1 para o ponto em 17-19.

Tabela 7. Quantidade de acessórios e comprimentos equivalentes

Trecho	Curva		Cotovelo		Tê		Válvula		Outros		Comp. Equivalente total (m)
	Quantidade	Comp. Equivalente (m)	Quantidade	Comp. Equivalente (m)	Quantidade	Comp. Equivalente (m)	Quantidade	Comp. Equivalente (m)	Quantidade	Comp. Equivalente (m)	
1 ao 5			4	2,7	1	8,4	1	21			40,2
2 ao 6			2	2,1			1	17			21,2
3 ao 7			2	1,6	1	5,2	1	13			21,4
4 ao 3	2	1	2	1,6	1	5,2					10,4
5 ao 6											0
6 ao 7											0
7 ao 20			1	3,4							3,4
8 ao 12	1	0,6	2	1,1			1	8,5			11,3
9 ao 13	1	0,6	2	1,1			1	8,5			11,3
10 ao 14	1	0,6	2	1,1			1	8,5			11,3
11 ao 15	1	0,6	2	1,1			1	8,5			11,3
12 ao 13											0
13 ao 14											0
14 ao 15											0
15 ao 19											0
18 ao 17									1	13	13
16 ao 17											0
17 ao 19			3	1,6							4,8
19 ao 20	1	2,4	1	4,3							6,7
20 ao 21			3	5,5							16,5
21 ao Filtro											0
Filtro ao 23	1	3,6	2	6,1							15,8

Fonte: Próprio autor.

Após a definição das perdas de carga devido ao atrito, à aceleração, aos acessórios e demais equipamentos, calculada pela Equação 17, aos captos, calculada pela Equação 18,

e às junções, calculada pela Equação 20, definiu-se a perda de carga em cada um dos trechos pelo somatório dos valores obtidos por essas três equações. Para a perda de carga total do sistema foram seguidas as considerações de Macyntire (1990) descritas no final do tópico 2.5.

Para verificar a eficiência dos exaustores, foi calculada a energia necessária a ser fornecida pelos mesmos frente à perda de carga apresentada pelo sistema, utilizando a Equação 11, tendo conhecimento de que o rendimento do exaustor é de aproximadamente 0,73, como apresentado no item 3.2.3, considerando que o sistema opere com vazão máxima e desconsiderando possíveis variações de temperatura, o que permite adotar valor constante a 20° (temperatura ambiente) para peso específico do ar.

Como já mencionado anteriormente, o sistema não atua com todos os trechos operando de forma contínua, sendo assim, é possível calcular a perda de carga total do sistema para mais de uma situação e, conseqüentemente, verificar a eficiência dos exaustores para cada uma delas. As diferentes possibilidades de operação do sistema são especificadas a seguir:

- (1) Caso os trechos de esvaziamento (1-5) e enchimento de *bins* (2-7 e 3-7) e preparo de aditivos (4-3) não operem;
- (2) Caso os trechos de enchimento de *bins* (2-7 e 3-7) não operem;
- (3) Caso apenas o trecho de esvaziamento de *bins* (1-5) não opere;
- (4) Caso apenas o trecho de preparo de aditivos (4-3) não opere;
- (5) Caso todos os trechos operem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após o levantamento das informações teóricas e dos dados do sistema de exaustão instalado, além da realização dos cálculos.

4.1 *Propriedades das partículas e tipo de transporte*

Como já descrito, a operação do sistema estudado é marcada por frequentes obstruções e um dos motivos para que isso ocorra são as características físicas dos sólidos transportados atualmente (tamanho e densidade).

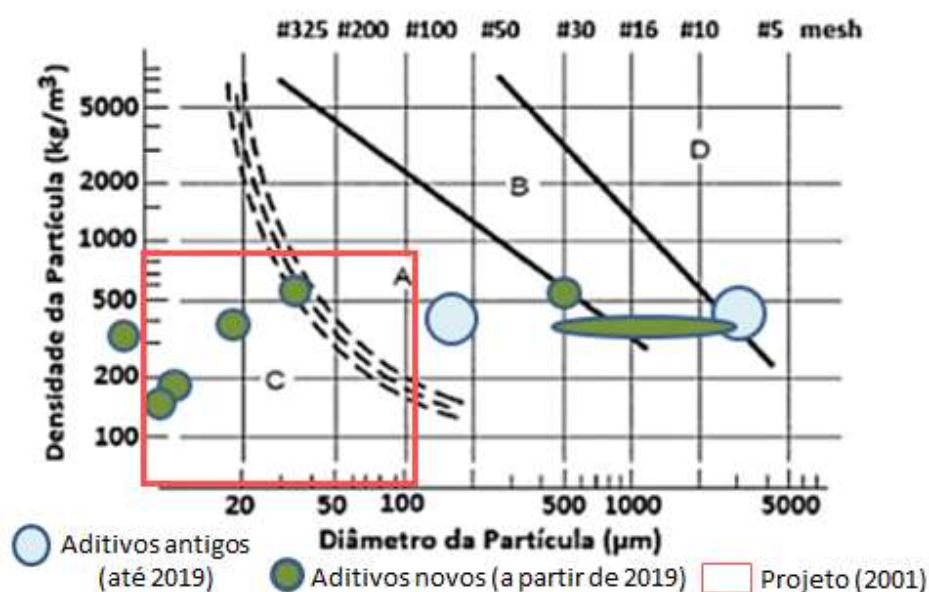
Por questões econômicas o portfólio de aditivos foi modificado em 2019 e as partículas transportadas, tanto no período antecessor, quanto no período sucessor a essa

modificação têm suas características especificadas na Tabela 4. Atualmente são transportados no sistema oito aditivos diferentes, porém são cinco os que exigem maior frequência de drenagem do filtro de mangas (2, 4, 5, 19 e 20).

Ao analisar as características dos sólidos utilizados atualmente foi possível verificar que todos possuem baixa umidade ($< 20\%$), o que segundo COSTA (2009), contribui para redução da probabilidade de que se agreguem nas paredes da tubulação, porém verifica-se também que os aditivos tendem a formar pontes e são coesivos nas paredes, além de possuírem propriedades higroscópicas que podem dificultar a fluidização. Além disso, ao classificá-los segundo o diagrama de Geldart (de acordo com seus tamanhos e densidades), nota-se que exceto pelos aditivos 1 e 2, que se encontram entre os grupos A e B, os outros seis se classificam como grupo C (Figura 13). Partículas do grupo C possuem alta tendência de acúmulo e penetração em curvas e trechos de tubulação, o que dificulta a fluidização e aumenta a probabilidade de obstrução, ademais, possuem como característica o fato de geralmente serem transportadas em fase densa (MCNAMARA *et al*, 2006), que é operada em pressões positivas, com altas concentrações de sólido e velocidades entre 6 e 20 m/s (TEIXEIRA, 2019).

O sistema de exaustão instalado atua com pressão negativa e a concentração de sólidos é baixa. Desse modo, apesar de partículas do grupo C serem geralmente transportadas em fase densa, o sistema será estudado considerando operação em fase diluída. Além disso, adotou-se o ar como fluido de processo e devido às baixas velocidades de escoamento, o mesmo foi tratado como fluido incompressível.

Figura 13. Propriedades dos aditivos (antigos, novos e de projeto) do sistema de exaustão local



Fonte: Adaptado de MILLS, 2004.

O projeto do sistema previa partículas dos grupos C e A, porém, ao longo do tempo, a operação passou a ocorrer, majoritariamente, com as dos grupos A e D. A partir de 2019, com os novos aditivos, o sistema passou a operar com uma maior diversidade, sólidos do grupo C e uma pequena parcela de B, além das transições entre A e D. Essas informações mostram que garantir a operabilidade a longo prazo é um assunto complexo e que exige uma série de fatores a serem estudados constantemente para que melhorias de processo sejam sugeridas.

4.2 Velocidade de transporte e diâmetros das tubulações

Segundo TEIXEIRA (2019), na fase diluída a velocidade do ar opera em uma faixa ampla de 15 a 40 m/s, sendo a velocidade recomendada para uma boa operabilidade a faixa entre 22 a 28 m/s. Para fontes do tipo *Bins*, *Hoppers* e enchimento e esvaziamento de barris, a velocidade mínima do ar no duto é de 17,8 m/s (ACGHI, 1998).

É recomendável que o sistema opere com velocidades dentro do intervalo indicado em literatura, uma vez que para valores abaixo do limite inferior há o risco de entupimento da linha e para valores acima do limite superior são geradas deformações nos sólidos, o que leva ao aumento da potência consumida pela máquina responsável pelo transporte e a corrosão das tubulações (TEIXEIRA, 2019).

Na Tabela 8, além dos valores para velocidade dos trechos de acordo com os dados de projeto e de acordo com os dados reais, foi verificado também os respectivos desvios em relação às velocidades teóricas adotadas.

Para os trechos com ponto de captação e após o filtro de mangas (ausência de particulado) a velocidade teórica adotada foi de 18 m/s, exceto nos trechos onde as velocidades de projeto ou real ficaram próximas a esse valor, situação na qual a velocidade teórica adotada permaneceu sendo igual à de projeto ou à real. Nos outros trechos a velocidade adotada foi de 22 m/s, sendo exceção o trecho 7-20 que possui velocidade teórica de 20 m/s, pois caso essa velocidade fosse de 22 m/s o diâmetro ideal do trecho seria de 7'', o que não é usual, segundo os valores de diâmetros presentes nos padrões de tubulações de aço (Anexo E).

Tabela 8. Velocidades dos trechos do sistema

Trecho	Velocidade teórica (m/s)	Velocidade de projeto (m/s)	Desvio da velocidade de projeto em relação à velocidade teórica	Velocidade Real (m/s)	Desvio da velocidade real em relação à velocidade teórica
1 ao 5 (captação)	17,5	19,6	12,0 %	17,5	0,0 %
2 ao 6 (captação)	18,0	15,3	-15,2 %	8,57	-52,4 %
3 ao 7 (captação)	19,6	19,6	0,0 %	48,7	148,0 %
4 ao 3 (captação)	18,0	-	-	-	-
5 ao 6	22,0	16,0	-27,3 %	12,2	-44,6 %
6 ao 7	22,0	21,0	-4,6 %	16,0	-27,3 %
7 ao 20	20,0	42,9	114,5 %	32,7	63,4 %
8 ao 12 (captação)	19,5	19,5	0,0 %	27,4	40,9 %
9 ao 13 (captação)	19,5	19,5	0,0 %	27,4	40,9 %
10 ao 14 (captação)	19,5	19,5	0,0 %	27,4	40,9 %
11 ao 15 (captação)	19,5	19,5	0,0 %	27,4	40,9 %
12 ao 13	22,0	2,45	-88,9 %	1,71	-92,2 %
13 ao 14	22,0	4,90	-77,7 %	3,43	-84,4 %
14 ao 15	22,0	7,34	-66,6 %	5,14	-76,6 %
15 ao 19	22,0	9,79	-55,5 %	6,85	-68,9 %
18 ao 17 (captação)	18,0	31,14	73,0 %	0,86	-95,2 %
16 ao 17 (captação)	18,0	-	-	1,28	-92,9 %
17 ao 19 (captação)	18,0	-	-	15,2	-15,4 %
19 ao 20	22,0	12,85	-41,6 %	8,99	-59,1 %
20 ao 21	17,5	15,17	-13,4 %	17,5	0,0 %
21 ao Filtro	17,5	10,77	-38,5 %	17,5	0,0 %
Filtro ao 22	18,0	5,41	-69,9 %	12,2	-32,4 %
22 ao 23	18,0	8,72	-51,5 %	12,2	-32,4 %

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os dados da Tabela 8 para todos os 11 trechos que possuem ponto de captação, nota-se que em 7 deles (1-5, 2-6, 3-7, 8-12, 9-13, 10-14, 11-15) as velocidades de projeto são coerentes com o previsto por ACGHI (1998), o que justifica os baixos valores para os desvios, dentro do intervalo de ± 15 %. Para a análise deste trabalho, desvios de velocidades dentro deste intervalo são aceitáveis. Chamam atenção as velocidades reais nos trechos de carregamento dos *bins* (3-7) e das balanças de aditivos (8-12, 9-13, 10-14, 11-15), que possuem desvios positivos, entre 40,9 % e 148 %, em relação à velocidade teórica adotada, o que potencializa as super exaustões dos particulados nestas fontes emissoras. Segundo ACGHI (1998), para as fontes nas quais não se deseja fazer uma captação excessiva dos particulados, pode-se optar em reduzir a vazão de ar no trecho. Existe a possibilidade de ajuste da vazão em cada um destes trechos a partir da regulagem manual de válvulas instaladas nestas linhas, o ponto agravante é que estas regulagens não podem ser realizadas de forma precisa e correta, uma vez que a vazão real não é monitorada continuamente devido à ausência de instrumentos de medição. Uma incorreta regulagem de forma estimada, implica na manipulação da velocidade que, consequentemente, se não for

estável e de acordo com a literatura, implicará em obstruções, super exaustões e altas perdas de carga.

Em apenas um dos trechos de captação (18-17) o desvio da velocidade de projeto em relação à velocidade teórica adotada é positivo e elevado (73 %), o que pode ser justificado pelo fato do diâmetro projetado ser pequeno, igual a 1,3'', como exposto na Tabela 5. Esta velocidade, mesmo que seja de projeto, não está adequada conforme sugere a literatura. No sistema real, esta velocidade é extremamente baixa (-95,2 % de desvio) o que pode dificultar o arraste das partículas ao longo do trecho.

Os outros três trechos de captação (4-3, 16-17, 17-19) não foram previstos no projeto, mas existem no sistema real, sendo importante salientar que um sistema de exaustão não deve apresentar alterações estruturais ao longo do tempo, pois o dimensionamento incorreto favorece a ineficiência do sistema. Nos trechos 16-17 e 17-19 as obstruções são recorrentes, o que pode ser justificado pelas baixas velocidades, principalmente em 16-17 (desvio de -92,9 %).

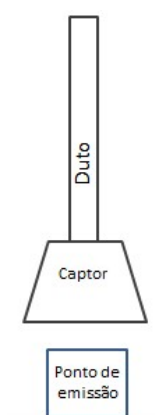
Para os trechos que não possuem ponto de captação a média de desvio das velocidades de projeto e real em relação a velocidade teórica adotada são, respectivamente, iguais à -35 % e -38 %, ou seja, as velocidades projetadas e as do sistema real são em média 36 % menores que o recomendado para se ter uma boa operabilidade e evitar entupimento de linha, segundo TEIXEIRA (2019).

De acordo com a Tabela 5, a partir da vazão pré definida para cada trecho, observa-se que as variações de velocidade entre o que foi projetado e o que é real são causadas por diferenças entre seus respectivos diâmetros. Como exemplos, para o trecho 2-6 (carregamento dos *bins*) o diâmetro projetado era de 3'', porém o real instalado é de 4'', essa diferença de 1'' resultou em uma diminuição da velocidade de 15,3 m/s para 8,6 m/s. Nos trechos 8-12, 9-13, 10-14, 11-15 (balanças de aditivos) o diâmetro projetado era de 2,4'' que garantia velocidade de 19,5 m/s, porém no sistema real o diâmetro instalado é de 2'', resultando em um aumento para 27,4 m/s e potencializando a super exaustão e maior perda de carga no sistema. Observa-se a importância de não realizar arredondamentos nos diâmetros para valores convencionais sem que a verificação da velocidade seja feita, pois sistemas como este, apresentam particularidades estruturais que visam garantir a operabilidade. Desta forma, ambos os casos não condizem com a recomendação para trechos com captação (velocidade igual ou próxima a 17,8 m/s).

4.3 Captores

Como já descrito, a operação do sistema estudado é marcada também por frequentes vazamentos de material particulado para o ambiente e um dos motivos para que isso ocorra é o mau dimensionamento dos captores. Este problema acontece em todos os pontos de captação, porém é mais frequente nos trechos 16-17 (esteira) e 8-12, 9-13, 10-14, 11-15 (balanças de aditivos), uma vez que o tipo de captor instalado não enclausura toda a fonte de emissão (Figura 14), como recomenda ACGHI (1998) para fontes são do tipo enchimento de barris, *bins* e *hoppers* (Anexos C e D).

Figura 14. Exemplo de instalação do captor nos pontos de exaustão da esteira e balanças de aditivos



Fonte: Próprio autor.

Segundo Furieri e Castilho (2009), quanto menor a distância entre a fonte emissora e o captor e quanto menor a quantidade de frestas abertas ele apresentar, mais eficiente é a captação. Os captores que enclausuram suas fontes de emissão seguem corretamente estas características.

4.4 Perda de carga e eficiência do sistema

As obstruções também podem ser analisadas verificando se os exaustores são de fato eficientes frente às características operacionais do sistema. Para isso, é necessário calcular a perda de carga, em unidade de pressão, e quantificar qual a correspondente energia necessária a ser fornecida pelos exaustores, em kW, para que os particulados possam ser transportados até o filtro manga.

Como já descrito anteriormente no item 3.2.5, após a definição das perdas de carga devido ao atrito, à aceleração, aos acessórios e demais equipamentos, aos captores e às junções, definiu-se a perda de carga em cada um dos trechos pelo somatório dos valores

(Tabela 9) e para a perda de carga resultante (total do sistema) foram seguidas as considerações de Macyntire (1990).

Para facilitar a avaliação e discussão dos dados expostos na Tabela 9, será dado maior atenção aos valores iguais ou superiores à 0,01 barg.

Tabela 9. Valores para perda de carga

Trecho	Perda de carga atrito + aceleração + acessórios	Coefficiente de entrada	Perda de carga nos captores	$\Delta P_t + \Delta P_c$	Perda de carga nas junções	Perda de carga resultante
	ΔP_t (barg)	C_e	ΔP_c (barg)	ΔP_{tc} (barg)	P (barg)	ΔP_R (barg)
1 ao 5 (captação)	0,02	0,63	0,003	0,02	0	0,02
2 ao 6 (captação)	0,003	0,63	0,001	0,004	0,0001	0,004
3 ao 7 (captação)	0,2	0,63	0,02	0,2	0,004	0,2
4 ao 3 (captação)	0,01	0,63	0,003	0,01	0	0,01
5 ao 6	0,001	0	0	0,001	0	0,001
6 ao 7	0,001	0	0	0,001	0	0,001
7 ao 20	0,05	0	0	0,05	0	0,05
8 ao 12 (captação)	0,05	0,49	0,01	0,06	0	0,06
9 ao 13 (captação)	0,05	0,49	0,01	0,06	0,001	0,06
10 ao 14 (captação)	0,05	0,49	0,01	0,06	0,001	0,06
11 ao 15 (captação)	0,05	0,49	0,01	0,06	0,001	0,06
12 ao 13	0,00001	0	0	0,00001	0	0,00001
13 ao 14	0,00003	0	0	0,00003	0	0,00003
14 ao 15	0,00006	0	0	0,00006	0	0,00006
15 ao 19	0,0002	0	0	0,0002	0	0,0002
18 ao 17 (captação)	0,00002	0,82	0,000002	0,00002	0	0,00002
16 ao 17 (captação)	0,000003	0,49	0,00003	0,00003	0	0,00003
17 ao 19 (captação)	0,005	0	0	0,005	0,001	0,006
19 ao 20	0,001	0	0	0,001	0,0001	0,001
20 ao 21	0,008	0	0	0,008	0	0,008
21 ao Filtro	0,001	0	0	0,001	0	0,001
Filtro ao 23	0,01	0	0	0,01	0	0,01

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os valores calculados para ΔP_t , é possível constatar que as maiores contribuições de perda de carga por atrito, aceleração e acessórios advêm dos trechos 1-5, 3-7, 4-3, 7-20, 8-12, 9-13, 10-14, 11-15 e filtro-23, que equivalem aos trechos de esvaziamento e enchimento de *bins*, de preparo de aditivos, às balanças e ao trecho que sucede o filtro manga. Isso se deve à contribuição dos comprimentos equivalentes, uma vez que todos esses trechos possuem acessórios; das altas velocidades (principalmente em

3-7, 7-20, 8-12, 9-13, 10-14 e 11-15) e da contribuição do equipamento de captação de sólidos, no caso do último trecho (filtro-23).

A perda de carga nos captadores (ΔP_c) são mais relevantes nos pontos de enchimento de *bins* (3-7) e das balanças (8-12, 9-13, 10-14 e 11-15), devido ao fato de que nesses trechos as velocidades reais são muito altas se comparadas às velocidades recomendadas, apresentando desvios entre 40,9 % e 148 %.

Todos os trechos que possuem acessórios apresentam valores significativos para a perda de carga resultante, mesmo que menores que 0,01 barg, o que permite afirmar que os acessórios contribuem para o aumento da perda de carga. Porém nota-se que os trechos de enchimento de *bins* e das balanças, que apresentam velocidades altas, muito acima do recomendado, possuem os valores mais relevantes para a perda de carga resultante, o que permite afirmar que a maior contribuição para a perda advém das altas velocidades, como esperado.

Na Tabela 10 são apresentadas a perda de carga, a vazão e a potência do sistema para cada uma das situações de operação, além das condições nas quais o exaustor foi projetado.

Tabela 10. Perda de carga, vazão e potência para as diversas condições de operação do sistema

Situação de operação	ΔP_{total} (barg)	ΔP_{total} (mmH ₂ O)	ΔP_{total} (Kgf/m ²)	Vazão (m ³ /h)	Vazão (m ³ /s)	Pot motriz (kW)
Projeto	0,05	510	510	3950	1,10	8
(1)	0,07	714	714	1050	0,29	3
(2)	0,08	816	816	2146	0,60	7
(3)	0,22	2243	2243	2396	0,67	20
(4)	0,24	2447	2447	2900	0,81	27
(5)	0,26	2651	2651	3196	0,89	32

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que os exaustores são projetados para fornecer uma potência de 8 kW, energia suficiente para transportar os sólidos em um sistema com perda de carga total de 0,05 barg. Esse valor equivale a cada um dos trechos das balanças, sendo assim, apenas nas situações (1) e (2) os exaustores satisfazem a demanda, para as outras três situações (3, 4 e 5) os exaustores são sobrecarregados, não fornecendo a energia necessária para movimentação dos sólidos no transporte pneumático, o que favorece as obstruções.

Para que os exaustores não precisem ser trocados, uma das possibilidades é aumentar os diâmetros dos trechos que apresentam altas velocidades (3-7, 7-20, 8-12, 9-13, 10-14 e 11-15) para que as mesmas sofram redução, o que resultaria em uma diminuição de perda de carga e consequente redução de energia demandada dos exaustores. Os trechos 3-7

e 7-20 podem ter seus diâmetros ajustados para 120 mm e 194,8 mm, respectivamente, o que garantiria uma velocidade de 20 m/s para ambos, enquanto os outros trechos (3-7 8-12 9-13 10-14 11-15) teriam velocidades de 19 m/s, caso seus diâmetros fossem ajustados de acordo com o projetado (60,3 mm).

Na Tabela 11 são expostos os novos valores simulados para perda de carga, frente as sugestões de modificações acima citadas, e na Tabela 12 tem-se os percentuais de redução.

Tabela 11. Valores para perda de carga (melhoria)

Trecho	Perda de carga atrito + aceleração + acessórios	Perda de carga nos captosres	$\Delta P_t + \Delta P_c$	Perda de carga nas junções	Perda de carga resultante
	ΔP_t (barg)	ΔP_c (barg)	ΔP_{tc} (barg)	P (barg)	ΔP_R (barg)
3 ao 7 (captação)	0,02	0,004	0,02	0,0006	0,02
7 ao 20	0,01	0	0,01	0	0,01
8 ao 12 (captação)	0,02	0,007	0,03	0	0,03
9 ao 13 (captação)	0,02	0,007	0,03	0,0004	0,03
10 ao 14 (captação)	0,02	0,007	0,03	0,0004	0,03
11 ao 15 (captação)	0,02	0,007	0,03	0,0004	0,03

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12. Percentuais para redução de perda de carga

Trecho	Perda de carga atrito + aceleração + acessórios	Perda de carga nos captosres	$\Delta P_t + \Delta P_c$	Perda de carga nas junções	Perda de carga resultante
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
3 ao 7 (captação)	-90 %	-80 %	-90 %	-85 %	-90 %
7 ao 20	-80 %	-	-80 %	-	-80 %
8 ao 12 (captação)	-60 %	-30 %	-50 %	-	-50 %
9 ao 13 (captação)	-60 %	-30 %	-50 %	-60 %	-50 %
10 ao 14 (captação)	-60 %	-30 %	-50 %	-60 %	-50 %
11 ao 15 (captação)	-60 %	-30 %	-50 %	-60 %	-50 %
Média	-68 %	-40 %	-62 %	-66 %	-62 %

Fonte: Próprio autor.

Para os trechos 3-7 e 7-20 é possível verificar redução acima de 80 % para todas as contribuições, além de reduções de 90 % e 80 %, respectivamente para a perda de carga resultante. Já para os outros quatro trechos (área das balanças), verificam-se reduções superiores a 50 %, exceto pela contribuição de perda de carga nos captosres. A média de redução para perda de carga resultante é de 62 %, o que resulta em uma perda de carga total para o sistema igual à 0,07 barg. Essa análise evidencia a afirmação já feita anteriormente, de que as velocidades possuem forte influência na perda de carga do sistema.

Considerando que todos os trechos do sistema operem de forma contínua a potência exigida dos exaustores instalados é de 9 kW, ou seja, as modificações sugeridas implicariam na não sobrecarga das máquinas, o que evitaria obstruções e melhora a eficiência do sistema.

4.5 Redimensionamento do sistema de exaustão

Tendo em vista a complexidade em se determinar qual o melhor tipo de transporte pneumático de acordo com as propriedades da partícula, uma vez que os materiais transportados seguem diferentes classificações de Geldart, este tópico irá propor alterações físicas (de instalação) no sistema de exaustão, que são recomendadas pela literatura apresentada neste trabalho. Esta nova proposta de projeto tem como objetivo melhorar a eficiência do sistema, reduzindo as obstruções, a perda de carga total e a perda de particulados tanto para o ambiente quanto nas super exaustões.

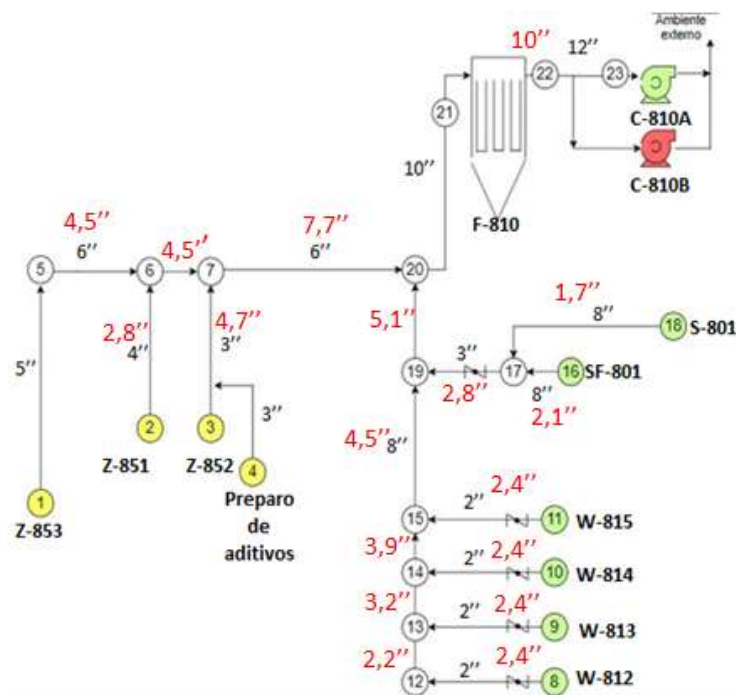
Pelos dados discutidos no item 4.4, foi possível notar, conforme observado na Tabela 10, que o sistema, a depender de quantos e quais equipamentos estão em operação, torna-se ineficiente pois os exaustores não são capazes de fornecer a energia necessária para vencer a perda de carga total. Deste modo, é interessante que esta perda de carga seja minimizada. A maior contribuição deste parâmetro está na perda de carga total por atrito que depende da velocidade e diâmetro dos trechos de tubulação. E, como muito discutido, a velocidade influencia fortemente na eficiência do transporte das partículas, já que a perda de carga está diretamente relacionada com a energia cinética.

Sendo assim, o redimensionamento do sistema tem como principais propostas a modificação dos diâmetros, a partir das velocidades teóricas recomendadas por trecho mencionadas na Tabela 8 e a instalação de novos captores, conforme os anexos C e D, nos trechos discutidos no item 4.3. Os novos parâmetros do sistema de exaustão encontram-se na Tabela 13. A Figura 15 indica os novos diâmetros em cada um dos trechos de tubulação (em vermelho) além dos diâmetros reais instalados (em preto).

Tabela 13. Novos diâmetros e perdas de carga do sistema de exaustão

Trecho	Diâmetro (")	Diâmetro (mm)	Desvio do novo diâmetro em relação ao de projeto	Desvio do novo diâmetro em relação ao real	ΔP_t (barg)	C_e	ΔP_c (barg)	ΔP_{tc} (barg)	P (barg)	ΔP_r (barg)
1 ao 5 (captação)	5,0	127	5,8 %	0,0 %	0,02	0,63	0,003	0,02	0	0,02
2 ao 6 (captação)	2,8	70,1	-7,9 %	-31,0 %	0,02	0,63	0,003	0,02	0,001	0,02
3 ao 7 (captação)	4,7	120	0,0 %	57,5 %	0,02	0,63	0,004	0,02	0,001	0,02
4 ao 3 (captação)	3,0	76,2	-	0,0 %	0,01	0,63	0,003	0,01	0	0,01
5 ao 6	4,5	113	-14,7 %	-25,6 %	0,004	0	0	0,004	0	0,004
6 ao 7	5,1	130	-2,3 %	-14,7 %	0,002	0	0	0,002	0	0,002
7 ao 20	7,7	195	46,5 %	27,8 %	0,01	0	0,0	0,01	0	0,01
8 ao 12 (captação)	2,4	60,3	0,0 %	18,7 %	0,02	0,63	0,003	0,03	0	0,03
9 ao 13 (captação)	2,4	60,3	0,0 %	18,7 %	0,02	0,63	0,003	0,03	0,0004	0,03
10 ao 14 (captação)	2,4	60,3	0,0 %	18,7 %	0,02	0,63	0,003	0,03	0,0004	0,03
11 ao 15 (captação)	2,4	60,3	0,0 %	18,7 %	0,02	0,63	0,003	0,03	0,0004	0,03
12 ao 13	2,2	56,7	-66,6 %	-72,1 %	0,005	0	0	0,005	0	0,005
13 ao 14	3,2	80,2	-52,8 %	-60,5 %	0,004	0	0	0,004	0	0,004
14 ao 15	3,9	98,2	-42,2 %	-51,7 %	0,003	0	0	0,003	0	0,003
15 ao 19	4,5	113	-33,3 %	-44,2 %	0,01	0	0	0,01	0	0,01
18 ao 17 (captação)	1,7	44,3	31,5 %	-78,2 %	0,04	0,82	0,0009	0,04	0	0,04
16 ao 17 (captação)	2,1	54,3	-	-73,3 %	0,003	0,63	0,003	0,01	0	0,01
17 ao 19 (captação)	2,8	70,1	-	-8,0 %	0,007	0	0	0,01	0,002	0,01
19 ao 20	5,1	130	-23,6 %	-36,1 %	0,006	0	0	0,01	0,0008	0,01
20 ao 21	10,0	254	-6,96 %	0,0 %	0,008	0	0	0,01	0	0,01
21 ao Filtro	10,0	254	-21,6 %	0,0 %	0,001	0	0	0,00	0	0,001
Filtro ao 23	9,9	251	-30,4 %	-17,8 %	0,02	0	0	0,02	0	0,02

Fonte: Próprio autor.

Figura 15. Novos diâmetros para o sistema de exaustão

Fonte: Próprio autor.

Considerando que todos os pontos de exaustão operem juntos e continuamente, no novo projeto a perda de carga resultante calculada é igual a 0,09 barg. Valor inferior à perda de carga resultante do sistema atual (0,26 barg), como mencionado no tópico 4.4. Esta redução é fortemente impactada pela diminuição das perdas de carga nos trechos 3-7, 8-12, 9-13, 10-14 e 11-15, os quais possuem potenciais de super exaustão como já discutido nos itens 4.2 e 4.3, além do trecho 7-20. Observa-se pela Tabela 13 que estes trechos tiveram suas perdas de carga reduzidas em 86 % no trecho 3-7, 72 % no 7-20 e 84 % nos 8-12, 9-13, 10-14 e 11-15. Além disso, todos os outros trechos de tubulação, com exceção dos 1-5, 4-3, 20-21 e 21-Filtro que não terão modificações nos seus diâmetros, tiveram suas perdas de carga aumentadas, devido à readequação das velocidades, uma vez que o sistema atual opera com estas em valores muito baixos e diferentes das recomendações teóricas. Ao aumentá-las e readequá-las, necessariamente a perda de carga aumenta, porém não afeta negativamente na eficiência do sistema como um todo.

Em relação à nova proposta dos captosres, nota-se pela Tabela 13 que os novos coeficientes de entrada C_e são iguais a 0,63, ou seja, a utilização de captosres enclausurantes nas balanças de aditivos e na esteira implicam em reduzir a perda de carga deste acessório em 75,8 % nas balanças (redução do ΔP_c de 0,01 barg para 0,003 barg). Os dados mostram-se coerentes pois ao utilizar captosres que não enclausuram suas fontes de emissão, a resistência do ar torna-se uma barreira a ser vencida pelas partículas que precisam ser

exauridas. Já na esteira, a perda de carga deste acessório (ΔP_c) aumentou de 0,0003 barg para 0,003 barg (valor absoluto praticamente irrelevante) por conta do alto aumento percentual da velocidade (92,9 %) em relação ao sistema real, indicando novamente a grande influência da velocidade. Porém, ainda assim, é mais eficiente utilizá-lo ao invés do instalado, o qual possui frestas e contribui nas perdas de material particulado para o ambiente.

A fim de verificar a eficiência dos exaustores na nova proposta de projeto, foi recalculada a energia necessária a ser fornecida pelos mesmos frente à nova perda de carga (0,09 barg) apresentada pelo sistema, considerando que a operação ocorra com vazão máxima em todos os trechos levantados. Os dados encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14. Perda de carga, vazão e potência estimadas para o novo projeto

Situação de operação	ΔP_{total} (barg)	ΔP_{total} (mmH ₂ O)	ΔP_{total} (Kgf/m ²)	Vazão (m ³ /h)	Vazão (m ³ /s)	Pot motriz (kW)
Novo projeto	0,09	918	918	3196	765	11

Por fim, estima-se que a potência (absorvida) necessária a ser fornecida pelos exaustores é de 11 kW. Como estes equipamentos possuem potência absorvida e instalada iguais a 8 kW e 11 kW, respectivamente, entende-se que eles sejam capazes de atender à nova perda de carga, ainda que trabalhem em suas capacidades máximas e um na reserva do outro (pois estão instalados em paralelo).

Além das melhorias de processo apresentadas neste tópico a fim de garantir eficiência e boa operabilidade, também são essenciais os impactos positivos na saúde das pessoas e na segurança de processo que estas propostas contêm.

Segundo BRASIL (2018), partículas inaláveis finas (MP_{2,5}) possuem diâmetros de até 2,5 µm e as partículas inaláveis (MP₁₀) são de até 10 µm. Dos 8 novos aditivos presentes no sistema de exaustão, três deles recebem estas classificações (aditivos 5, 19 e 20) que em conjunto com a realidade dos vazamentos para o ambiente, impactam negativamente na saúde dos trabalhadores que permanecem diariamente em contato com o sistema.

Conforme já mencionado por RABELO (2020), é importante que os sistemas de exaustão sejam corretamente dimensionados pois eles atuam como prevenção de cenários com risco de explosão em pó. Além disso, a NFPA 654 (2013) não recomenda a realização da limpeza do sistema e de superfícies com acúmulo de pó a partir de técnicas que utilizem ar comprimido ou sopragem, mas sim a lavagem com água ou aspiração do material particulado.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os parâmetros de processo que se mostraram potenciais causadores dos frequentes problemas de obstruções foram as propriedades das partículas (majoritariamente pertencentes ao grupo C, além de possuírem características qualitativas que também dificultam a fluidização), as velocidades de escoamento em alguns trechos (menores que os valores mínimos recomendados) e o fato dos exaustores trabalharem de forma sobrecarregada dependendo da quantidade de pontos em operação no sistema (fator influenciado pela perda de carga, que apresentou valores de maior impacto nos trechos com velocidades acima da faixa recomendada para boa operabilidade do sistema), o que implica nas dificuldades de fluidização e portanto, na redução da eficiência. Além disso, as super exaustões acontecem devido às altas velocidades em alguns trechos de captação, maiores que o recomendado de 17,8 m/s e as perdas de partículas para o ambiente ocorrem devido à utilização de captosres não enclausurantes.

Como conclusões secundárias, tem-se os seguintes pontos:

- É importante que os sistemas de exaustão não sofram modificações ao longo do tempo sem que as considerações de projeto sejam analisadas, como aconteceu em situações das quais os diâmetros de projeto não correspondem aos diâmetros que, de fato, foram instalados.
- Definir o melhor tipo de transporte pneumático, se fase diluída ou fase densa, é uma etapa difícil, inclusive se o sistema comportar partículas de diferentes classificações de Geldart. Nesse caso, o projeto previa partículas majoritariamente do grupo C, porém, o sistema real trabalha atualmente com as do grupo C, B e transições entre A e D. Desta forma, a eficiência operacional torna-se mais complexa.
- Na proposta de redimensionamento do sistema, houve diminuição da perda de carga nos captosres ao considerá-los enclausurantes, além disso, esta configuração permite uma captação de partículas mais eficiente.
- A perda de carga do sistema é superior ao seu valor esperado pelo projeto devido aos trechos com potenciais de super exaustão (carregamento de *bins* e balanças de aditivos), uma vez que a maior contribuição é proveniente da perda de carga por atrito. Ao modificar apenas os diâmetros destes trechos, na melhoria proposta, estima-se que a energia necessária a ser fornecida pelos exaustores será atendida pelos mesmos.
- As perdas de carga nas junções mostraram-se praticamente irrelevantes para o sistema como um todo. A perda de carga referente aos acessórios, a partir do comprimento

equivalente, teve um maior impacto no trecho de esvaziamento de *bins* visto que é o trecho com maior número de acessórios instalados. Porém, a velocidade (perda de carga por atrito), é o parâmetro que mais impacta na eficiência do sistema.

Para os trabalhos futuros, sugere-se alguns tópicos a serem investigados:

- Medir as vazões reais utilizando um medidor de vazão ou medir as velocidades do ar utilizando um anemômetro, em cada trecho de linha do sistema, na área industrial;
- Recalcular as perdas de carga baseando-se nas vazões reais medidas e também a potência necessária a ser fornecida pelos exaustores para avaliar se o vácuo é de fato eficiente, variando a quantidade de pontos de exaustão em operação;
- Instalar um manômetro na sucção dos exaustores para que seja possível verificar momentos de obstrução no sistema.
- Como medida a longo prazo, readequar o sistema como um todo, a partir de um novo projeto como discutido no item 4.5, baseando-se na recomendação principal das velocidades (de 18 m/s a 22 m/s).

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, B. J. M. Desenvolvimento de Sistema de Avaliação de Desempenho para Compressor de Metano Refrigerante. Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET/SP. Rio de Janeiro – RJ, 2015.
- ACGHI - AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice. 23rd ed. Ohio - USA, 1998.
- ALMEIDA, I. T. A Poluição Atmosférica por Material Particulado na Mineração a Céu Aberto. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo. São Paulo - SP, 1999.
- BRASIL. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União: Brasília – DF, ed. 223, seção 1, pág. 155, 21 nov. 2018.
- BRITO, G. F. S. et al. Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar. Revista Virtual de Química, v.10, n.5, 2018.
- CASTANHO, A. D. A. A Determinação Quantitativa de Fontes de Material Particulado na Atmosfera da Cidade de São Paulo. Dissertação de mestrado – Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 1999.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Poluentes - Qualidade do ar. [s.d]. Disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 27 mar. 2020.
- COSTA, C. F. F. Desenvolvimento de um programa de dimensionamento de instalações para transporte pneumático. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – PT, 2009.
- COSTA, E. C. Ventilação. São Paulo – SP: Blucher, 2005.
- CROWL, D. A. Understanding Explosions. Department of Chemical Engineering Michigan Technological University. New York – USA, 2003.
- FINLAYSON-PITTS, B. J. e PITTS, JR., J. N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments and Applications. California – USA: Academic Press, 2000.
- FURIERI, B. e CASTILHO, L. B. Elaboração de Projetos de Aperfeiçoamento do Sistema de Controle de Material Particulado em uma Unidade Industrial: Processamento Final de Cimento Portland. 146 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória - ES, 2009.
- GOMIDE, R. Operações Unitárias. 1º Volume: Operações com sistemas sólidos granulares. São Paulo: Edição do autor, 1983.
- GVR – Grand View Research. Relatório de análise de tamanho de mercado, compartilhamento e tendências por princípio operacional, por tecnologia, por uso final e por previsões de segmento, 2019-2025. [s.d]. Disponível em <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/pneumatic-conveying-system-market>>. Acesso em: 04 jul. 2020.

KSB – Bombas Hidráulicas S/A. Manual de treinamento: Seleção e aplicação de bombas centrífugas. 5ª ed. São Paulo, 2003.

LOURENÇO, G. A. Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade: proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica. Dissertação de doutorado – Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2019.

MACINTYRE, A. J. Ventilação Industrial e Controle da Poluição. 2ª ed. Rio de Janeiro – RJ: JC E ditora e Distribuidora de Livros LTDA, 1990.

MARTINEZ. Estruturas Metálicas e Serralheiras. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.martineze estruturas.com.br/index2.php?pag=servicos>>. Acesso em: 02 abril 2020.

McNAMARA, S.; STRAUB, M.; ZELLER, F. Simulations of Dense-phase Pneumatic Conveying. Universidade de Stuttgart. Alemanha, 2006.

MECABÔ, L. Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema Especialista para Apoio à Manutenção de Turbocompressores Centrífugos de Gás Natural. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC, 2007.

MILLS, D. Pneumatic Conveying Design Guide. 2ª ed. Canterbury, Inglaterra. 2004.

M.N ESTRUTURAS. Cobertura Lantermim. [s.d.]. Disponível em: <<https://m-n-estruturas8.webnode.com/servi%C3%A7os/cobertura-lanternim/>>. Acesso em: 02 abril 2020.

NFPA 654. Standart for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids. National Fire Protection Association, 2013.

OH&S. Occupation Health & Safety. NFPA 654 2013 Edition Revised Requirements for Housekeeping. Março, 2013. Disponível em: <<https://ohsonline.com/Articles/2013/03/01/NFPA-654-2013-Edition-Revised-Requirements-for-Housekeeping.aspx?Page=3>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

PERRY, R. H. GREEN, D. W. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 8ª ed. Estados Unidos – USA. McGraw-Hill Companies, 2007.

RABELO, C. M. Estudo sobre explosões com material particulado: uma análise do caso da Imperial Sugar Company. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ, 2020.




















RIBEIRO, M. A. Válvulas de Controle e Segurança. 5ª ed. Salvador – BA: Editora Primavera, 1999.

TEIXEIRA, C. Transporte Pneumático: Conceitos e Especificações. 1ª ed. Rio de Janeiro – RJ: Editora Bonecker LTDA, 2019.

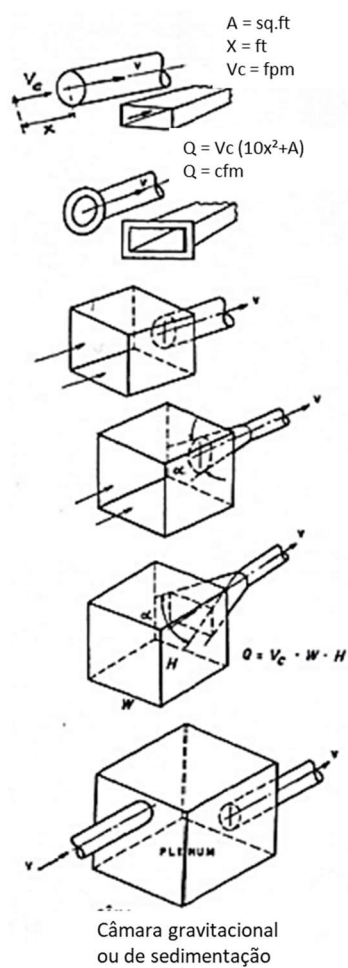
THEODORE, L. Air Pollution Control Equipmet Calculations. New Jersey: Wiley, 2008.

7. ANEXOS

Anexo A – Comprimentos equivalentes a perdas localizadas (Expressos em metros de canalização retilínea (KSB, 2003))

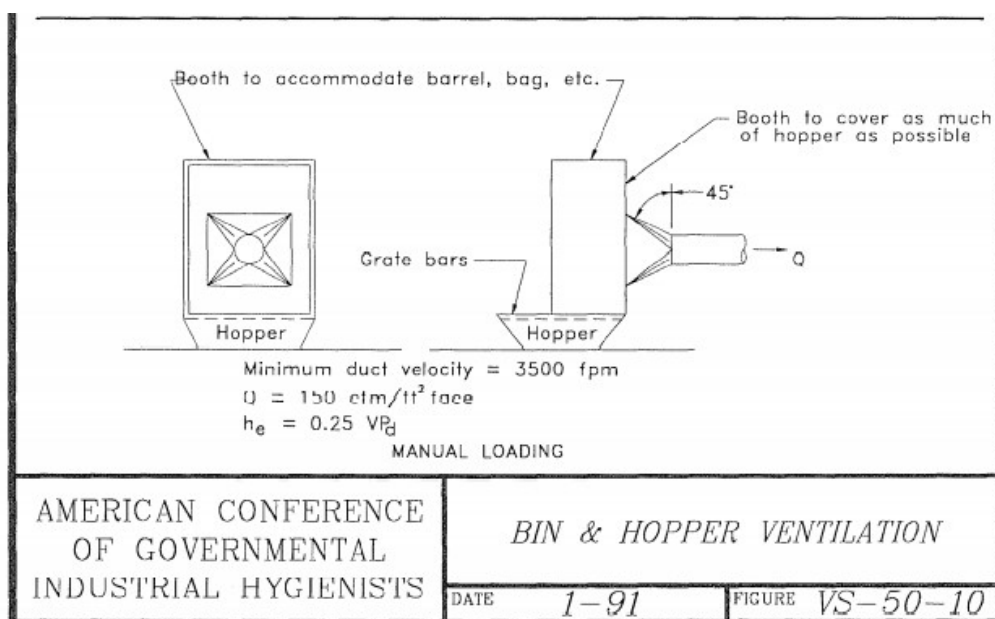
DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MEDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAIDA DE LADO	TÊ SAIDA BILATERAL	VÁLVULA DE PE E CRIVO	SAIDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

**Anexo B – Formatos geométricos para captosres convencionais (Adaptado de
MACINTYRE, 1990)**

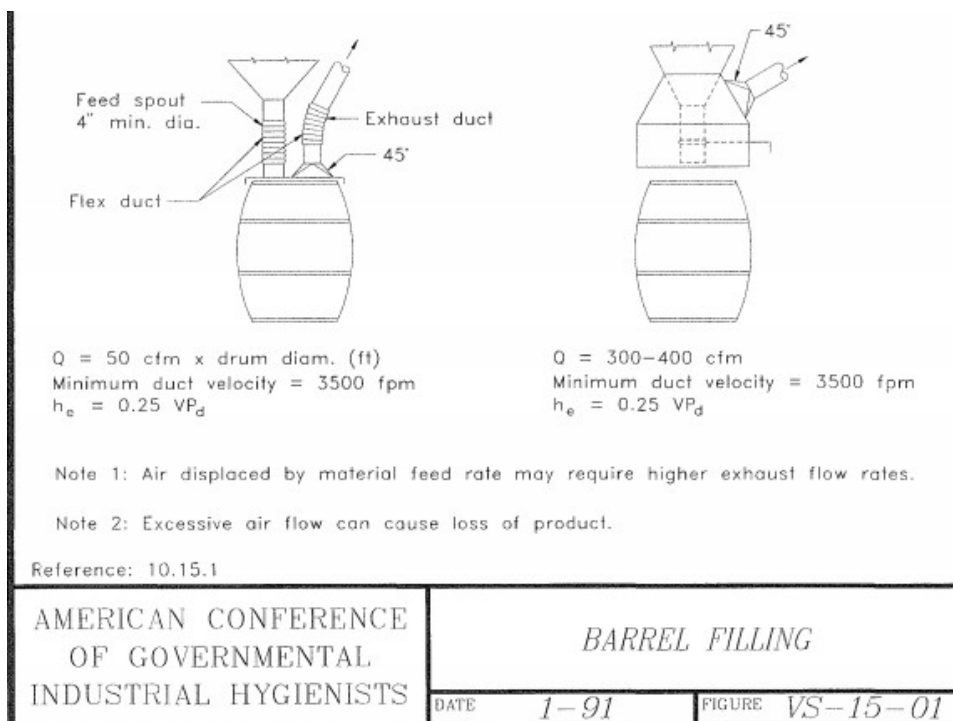


Coef. de entrada Ce			Coef. de perda de carga F	
0,93			0,72	
0,49			0,82	
0,82			0,50	
Ângulo α	○	□	○	□
15°	0,93	0,89	0,15	0,25
30°	0,96	0,93	0,08	0,16
45°	0,97	0,93	0,06	0,15
60°	0,96	0,92	0,08	0,17
90°	0,93	0,89	0,15	0,25
0,63			1,5	

Anexo C - Condições de instalação de Captor e velocidade mínima recomendada em bins e hoppers (ACGHI, 1998)



Anexo D - Condições de instalação de Captor e velocidade mínima recomendada em enchimento de barris (ACGHI, 1998)



Anexo E – Propriedades de tubulações de aço (PERRY, 2007)

Nominal pipe size, in	Outside diameter, in	Schedule no.	Wall thickness, in	Inside diameter, in	Cross-sectional area		Circumference, ft, or surface, ft ² /ft of length		Capacity at 1-ft/s velocity		Weight of plain-end pipe, lb/ft
					Metal, in ²	Flow, ft ²	Outside	Inside	U.S. gal/min	lb/h water	
1/8	0.405	10S	.049	.307	.055	.00051	.106	.0804	.231	115.5	.19
		40ST, 40S	.068	.269	.072	.00040	.106	.0705	.179	89.5	.24
		80XS, 80S	.095	.215	.093	.00025	.106	.0563	.113	56.5	.31
1/4	0.540	10S	.065	.410	.097	.00092	.141	.107	.412	206.5	.33
		40ST, 40S	.088	.364	.125	.00072	.141	.095	.323	161.5	.42
		80XS, 80S	.119	.302	.157	.00050	.141	.079	.224	112.0	.54
3/8	0.675	10S	.065	.545	.125	.00162	.177	.143	.727	363.5	.42
		40ST, 40S	.091	.493	.167	.00133	.177	.129	.596	298.0	.57
		80XS, 80S	.126	.423	.217	.00098	.177	.111	.440	220.0	.74
1/2	0.840	5S	.065	.710	.158	.00275	.220	.186	1.234	617.0	.54
		10S	.083	.674	.197	.00248	.220	.176	1.112	556.0	.67
		40ST, 40S	.109	.622	.250	.00211	.220	.163	0.945	472.0	.85
		80XS, 80S	.147	.546	.320	.00163	.220	.143	0.730	365.0	1.09
		160	.188	.464	.385	.00117	.220	.122	0.527	263.5	1.31
		XX	.294	.252	.504	.00035	.220	.066	0.155	77.5	1.71
3/4	1.050	5S	.065	.920	.201	.00461	.275	.241	2.072	1036.0	0.69
		10S	.083	.884	.252	.00426	.275	.231	1.903	951.5	0.86
		40ST, 40S	.113	.824	.333	.00371	.275	.216	1.665	832.5	1.13
		80XS, 80S	.154	.742	.433	.00300	.275	.194	1.345	672.5	1.47
		160	.219	.612	.572	.00204	.275	.160	0.917	458.5	1.94
		XX	.308	.434	.718	.00103	.275	.114	0.461	230.5	2.44
1	1.315	5S	.065	1.185	.255	.00768	.344	.310	3.449	1725	0.87
		10S	.109	1.097	.413	.00656	.344	.287	2.946	1473	1.40
		40ST, 40S	.133	1.049	.494	.00600	.344	.275	2.690	1345	1.68
		80XS, 80S	.179	0.957	.639	.00499	.344	.250	2.240	1120	2.17
		160	.250	0.815	.836	.00362	.344	.213	1.625	812.5	2.84
		XX	.358	0.599	1.076	.00196	.344	.157	0.878	439.0	3.66
1 1/2	1.900	5S	.065	1.770	0.375	.01709	.497	.463	7.67	3835	1.28
		10S	.109	1.682	0.614	.01543	.497	.440	6.94	3465	2.09
		40ST, 40S	.145	1.610	0.800	.01414	.497	.421	6.34	3170	2.72
		80XS, 80S	.200	1.500	1.069	.01225	.497	.393	5.49	2745	3.63
		160	.281	1.338	1.429	.00976	.497	.350	4.38	2190	4.86
		XX	.400	1.100	1.885	.00660	.497	.288	2.96	1480	6.41
2	2.375	5S	.065	2.245	0.472	.02749	.622	.588	12.34	6170	1.61
		10S	.109	2.157	0.776	.02538	.622	.565	11.39	5695	2.64
		40ST, 40S	.154	2.067	1.075	.02330	.622	.541	10.45	5225	3.65
		80ST, 80S	.218	1.939	1.477	.02050	.622	.508	9.20	4600	5.02
		160	.344	1.687	2.195	.01552	.622	.436	6.97	3485	7.46
		XX	.436	1.503	2.656	.01232	.622	.393	5.53	2765	9.03
2 1/2	2.875	5S	.083	2.709	0.728	.04003	.753	.709	17.97	8985	2.48
		10S	.120	2.635	1.039	.03787	.753	.690	17.00	8500	3.53
		40ST, 40S	.203	2.469	1.704	.03322	.753	.647	14.92	7460	5.79
		80XS, 80S	.276	2.323	2.254	.02942	.753	.608	13.20	6600	7.66
		160	.375	2.125	2.945	.02463	.753	.556	11.07	5535	10.01
		XX	.552	1.771	4.028	.01711	.753	.464	7.68	3840	13.69
3	3.500	5S	.083	3.334	0.891	.06063	.916	.873	27.21	13,605	3.03
		10S	.120	3.260	1.274	.05796	.916	.853	26.02	13,010	4.33
		40ST, 40S	.216	3.068	2.228	.05130	.916	.803	23.00	11,500	7.58
		80XS, 80S	.300	2.900	3.016	.04557	.916	.759	20.55	10,275	10.25
		160	.438	2.624	4.213	.03755	.916	.687	16.86	8430	14.32
		XX	.600	2.300	5.466	.02885	.916	.602	12.95	6475	18.58
3 1/2	4.0	5S	.083	3.834	1.021	.08017	1.047	1.004	35.98	17,990	3.48
		10S	.120	3.760	1.463	.07711	1.047	0.984	34.61	17,305	4.97
		40ST, 40S	.226	3.548	2.680	.06870	1.047	0.929	30.80	15,400	9.11
		80XS, 80S	.318	3.364	3.678	.06170	1.047	0.881	27.70	13,850	12.50
4	4.5	5S	.083	4.334	1.152	.10245	1.178	1.135	46.0	23,000	3.92
		10S	.120	4.260	1.651	.09898	1.178	1.115	44.4	22,200	5.61
		40ST, 40S	.237	4.026	3.17	.08840	1.178	1.054	39.6	19,800	10.79

Nominal pipe size, in	Outside diameter, in	Schedule no.	Wall thickness, in	Inside diameter, in	Cross-sectional area		Circumference, ft. or surface, ft ² /ft of length		Capacity at 1-ft/s velocity		Weight of plain-end pipe, lb/ft
					Metal, in ²	Flow, ft ²	Outside	Inside	U.S. gal/ min	lb/h water	
5	5.563	80XS, 80S	.337	3.826	4.41	.07986	1.178	1.002	35.8	17,900	14.98
		120	0.438	3.624	5.58	0.07170	1.178	0.949	32.2	16,100	19.00
		160	.531	3.438	6.62	.06647	1.178	0.900	28.9	14,450	22.51
		XX	.674	3.152	8.10	.05419	1.178	0.825	24.3	12,150	27.54
		5S	.109	5.345	1.87	.1558	1.456	1.399	69.9	34,950	6.36
		10S	.134	5.295	2.29	.1529	1.456	1.386	68.6	34,300	7.77
		40ST, 40S	.258	5.047	4.30	.1390	1.456	1.321	62.3	31,150	14.62
		80XS, 80S	.375	4.813	6.11	.1263	1.456	1.260	57.7	28,850	20.78
		120	.500	4.563	7.95	.1136	1.456	1.195	51.0	25,500	27.04
		160	.625	4.313	9.70	.1015	1.456	1.129	45.5	22,750	32.96
6	6.625	XX	.750	4.063	11.34	.0900	1.456	1.064	40.4	20,200	38.55
		5S	.109	6.407	2.23	.2239	1.734	1.677	100.5	50,250	7.60
		10S	.134	6.357	2.73	.2204	1.734	1.664	98.9	49,450	9.29
		40ST, 40S	.280	6.065	5.58	.2006	1.734	1.588	90.0	45,000	18.97
		80XS, 80S	.432	5.761	8.40	.1810	1.734	1.508	81.1	40,550	28.57
		120	.562	5.501	10.70	.1650	1.734	1.440	73.9	36,950	36.39
		160	.719	5.187	13.34	.1467	1.734	1.358	65.9	32,950	45.34
		XX	.864	4.897	15.64	.1308	1.734	1.282	58.7	29,350	53.16
		5S	.109	8.407	2.915	.3855	2.258	2.201	173.0	86,500	9.93
		10S	.148	8.329	3.941	.3784	2.258	2.180	169.8	84,900	13.40
8	8.625	20	.250	8.125	6.578	.3601	2.258	2.127	161.5	80,750	22.36
		30	.277	8.071	7.265	.3553	2.258	2.113	159.4	79,700	24.70
		40ST, 40S	.322	7.981	8.399	.3474	2.258	2.089	155.7	77,850	28.55
		60	.406	7.813	10.48	.3329	2.258	2.045	149.4	74,700	35.64
		80XS, 80S	.500	7.625	12.76	.3171	2.258	1.996	142.3	71,150	43.39
		100	.594	7.437	14.99	.3017	2.258	1.947	135.4	67,700	50.95
		120	.719	7.187	17.86	.2817	2.258	1.882	126.4	63,200	60.71
		140	.812	7.001	19.93	.2673	2.258	1.833	120.0	60,000	67.76
		XX	.875	6.875	21.30	.2578	2.258	1.800	115.7	57,850	72.42
		160	.906	6.813	21.97	.2532	2.258	1.784	113.5	56,750	74.69
10	10.75	5S	.134	10.482	4.47	.5993	2.814	2.744	269.0	134,500	15.19
		10S	.165	10.420	5.49	.5922	2.814	2.728	265.8	132,900	18.65
		20	.250	10.250	8.25	.5731	2.814	2.685	257.0	128,500	28.04
		30	.307	10.136	10.07	.5603	2.814	2.655	252.0	126,000	34.24
		40ST, 40S	.365	10.020	11.91	.5475	2.814	2.620	246.0	123,000	40.48
		80S, 60XS	.500	9.750	16.10	.5185	2.814	2.550	233.0	116,500	54.74
		80	.594	9.562	18.95	.4987	2.814	2.503	223.4	111,700	64.43
		100	.719	9.312	22.66	.4729	2.814	2.438	212.3	106,150	77.03
		120	.844	9.062	26.27	.4479	2.814	2.372	201.0	100,500	89.29
		140, XX	1.000	8.750	30.63	.4176	2.814	2.291	188.0	94,000	104.13
12	12.75	160	1.125	8.500	34.02	.3941	2.814	2.225	177.0	88,500	115.64
		5S	0.156	12.438	6.17	.8438	3.338	3.26	378.7	189,350	20.98
		10S	0.180	12.390	7.11	.8373	3.338	3.24	375.8	187,900	24.17
		20	0.250	12.250	9.82	.8185	3.338	3.21	367.0	183,500	33.38
		30	0.330	12.090	12.88	.7972	3.338	3.17	358.0	179,000	43.77
		ST, 40S	0.375	12.000	14.58	.7854	3.338	3.14	352.5	176,250	49.56
		40	0.406	11.938	15.74	.7773	3.338	3.13	349.0	174,500	53.52
		XS, 80S	0.500	11.750	19.24	.7530	3.338	3.08	338.0	169,000	65.42
		60	0.562	11.626	21.52	.7372	3.338	3.04	331.0	165,500	73.15
		80	0.685	11.374	26.07	.7056	3.338	2.98	316.7	158,350	88.63
		100	0.844	11.062	31.57	.6674	3.338	2.90	299.6	149,800	107.32
		120, XX	1.000	10.750	36.91	.6303	3.338	2.81	283.0	141,500	125.49
		140	1.125	10.500	41.09	.6013	3.338	2.75	270.0	135,000	139.67
		160	1.312	10.126	47.14	.5592	3.338	2.65	251.0	125,500	160.27